



**Patrícia
Tabaço Simões**

**Análise de eficiência energética de uma proposta
construtiva para edifícios modulares**



**Patrícia
Tabaço Simões**

**Análise de eficiência energética de uma proposta
construtiva para edifícios modulares**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a coorientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof.^a Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Coorientador

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em primeiro lugar, aproveito este espaço, para agradecer o apoio e toda a disponibilidade, do orientador Prof. Carlos Relvas e Prof. Nelson Martins, ao longo de todo este trabalho.

De seguida, aproveito, também, para agradecer à minha família e amigos, em especial ao Jonas, pela paciência.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos:

UID/EMS/00481/2019-FCT - FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

PT2020 - SI I&DT - I&D em Co-Promoção, N.º 33325 - *BrickITsmart*, cofinanciado por Compete 2020, Portugal 2020 e União Europeia, Fundos Europeus Estruturais e de Investimento.

Da empresa *DesignBuilder Software Ltd* (<https://designbuilder.co.uk/>), que através do protocolo com a Universidade de Aveiro permitiu a utilização do *software* usado neste estudo.

palavras-chave

Modularidade, conforto térmico, eficiência energética, simulação dinâmica.

resumo

No processo de desenvolvimento de qualquer edifício é importante conciliar o desenvolvimento do projeto estrutural com o desenvolvimento do projeto energético. Este desafio toma uma proporção acrescida no caso da construção modular devido ao aumento do número e qualidade dos constrangimentos envolvidos. Neste estudo as decisões tomadas ao nível da solução construtiva, que englobam, por exemplo, a escolha dos materiais que compõem os elementos construtivos e as dimensões e volumetrias de um edifício com construção modular, são analisadas relativamente ao seu desempenho energético, avaliado através do consumo do sistema de climatização para garantir o conforto térmico dos ocupantes, tendo sido avaliado o efeito do clima, da orientação solar, da fração envidraçada da envolvente exterior e das cargas térmicas internas, nomeadamente daquelas dependentes do tipo de atividade metabólica desenvolvida no interior do módulo. Esta análise foi efetuada, recorrendo ao *software* de simulação dinâmica *DesignBuilder* que foi usado para o desenvolvimento de um estudo paramétrico que permitisse avaliar o impacto dos diferentes cenários considerados, sobre o consumo energético dos sistemas de climatização. O estudo desenvolvido, conjugado com as restantes restrições e condicionantes do projeto, permitiu estabelecer as dimensões mais adequadas dos vãos envidraçados assim como identificar algumas fragilidades do projeto do ponto de vista térmico, como por exemplo uma reduzida inércia térmica, e finalmente testar propostas de melhoria visando minimizar essas fragilidades. Assim, determinou-se que a variação da localização e do tipo de atividade física têm influência no consumo energético anual da construção modular e que a fraca inércia térmica é a maior limitação associada ao conceito.

Numa segunda fase do trabalho foi analisado o impacto de algumas variantes ao projeto base, relacionadas com a resposta a desafios estruturais e de impermeabilização, sobre o desempenho energético do módulo construtivo, nomeadamente a utilização de uma fachada exterior secundária, do tipo tenda, tendo sido concluído que para uma localização associada a um clima frio extremo, esta solução estrutural poderá ser vantajosa, do ponto de vista energético.

.

.

.

keywords

Modularity, thermal comfort, energy efficiency, dynamic simulation.

abstract

In the development process of any building it is important to reconcile the structural project with the energy project. This challenge takes an increased relevance in the case of modular construction due to the increase in the number and quality of the constraints involved. In this study the decisions taken at the level of the constructive solution, which include, for example, the choice of materials that compose the constructive elements and the dimensions and volumes of a building with modular construction, are analysed in relation to its energy performance, evaluated through the consumption of the HVAC system to ensure the thermal comfort of the occupants, having been evaluated the effect of the climate, solar orientation, the glass fraction of the exterior envelope and the internal thermal loads, particularly those dependent on the metabolic activity level considered within the module. This analysis was performed using the dynamic simulation software *Designbuilder* that was used for the development of a parametric study that allowed evaluating the impact of the different scenarios considered on the energy consumption of HVAC systems. The developed study in conjunction with the remaining restrictions and constraints of the project allowed to establish the most appropriate dimensions of the glazed spans as well as to identify some weaknesses of the project from a thermal point of view, such as a reduced thermal inertia, and finally test improvement proposals to minimize these fragilities. Thus, it was determined that the variation of the location and the type of physical activity have an influence on the annual energy consumption of the modular construction and that the low thermal inertia the major limitation associated with the concept.

In a second phase of the work, the impact of some variants of the base project on the energy performance of the module were analysed, namely those related to structural and waterproofing challenges, solved by the addition of an external element acting as a second skin or tent. At the end of this study it was concluded that this solution may be an advantage in countries with cold climates.

Índice Geral

Índice Geral	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas	VII
Lista de Siglas.....	IX
1. Introdução	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Objetivo Geral do Trabalho	1
1.3 Revisão Bibliográfica	2
1.3.1 Pré-Fabricados, Construção Modular, SIP.....	2
1.3.1.1 Pré-Fabricados.....	2
1.3.1.2 Construção Modular	5
1.3.1.3 SIP.....	18
1.3.2 Habitabilidade: Zona Ocupada e Conforto Térmico	20
1.3.2.1 Zona Ocupada.....	20
1.3.2.2 Conforto Térmico.....	21
1.3.3 Influência e Caracterização do Clima	27
1.3.4 Edifícios nZEB e Climatização Passiva	28
1.3.4.1 Edifícios nZEB	28
1.3.4.2 Climatização Passiva	29
1.3.5 Classe Energética de Edifícios	33
1.3.6 <i>Softwares</i> de sistemas de climatização em edifícios	34
1.3.7 Resumo e Conclusões do Capítulo	35
2. Projeto Energético	39
2.1 Sumário	39
2.2 Caracterização da Construção Modular	39
2.2.1 Dimensões	39
2.2.1.1 Tipologias	40
2.2.2 Aberturas	40
2.2.3 Materiais.....	41
2.2.4 Localização.....	43

2.2.5 Orientação	43
2.2.6 Atividade.....	44
2.2.7 Soluções de Climatização Seleccionadas.....	45
2.2.7.1 Solução de Climatização para Lisboa, Portugal.....	45
2.2.7.2 Solução de Climatização para Helsínquia, Finlândia	49
2.3 Metodologia	51
2.4 Parâmetros	54
2.5 Análise da Inércia Térmica da Construção Modular	55
2.6 Estudo Paramétrico	58
2.6.1 Desempenho do Edifício em Lisboa, Portugal	58
2.6.2 Desempenho do Edifício em Helsínquia, Finlândia.....	62
2.7 Análise e Definição das Dimensões dos Vãos Envidraçados	64
2.7.1 Análise do Consumo Energético	64
2.7.1.1 Clima Lisboa, Portugal	64
2.7.1.2 Clima Helsínquia, Finlândia.....	66
2.7.2 Definição das Dimensões dos Vãos Envidraçados	67
2.8 Estimativa e Caracterização do Consumo Energético.....	68
2.8.1 Análise dos Resultados Anuais de Consumo Energético	70
2.9 Propostas de Melhoria	82
2.9.1 Aumento da Inércia Térmica	83
2.9.2 Configuração do Sistema AVAC	87
2.10 Resumo e Conclusões do Capítulo	89
3. Projeto Energético com Tenda	91
3.1 Sumário.....	91
3.2 Estratégias Utilizadas.....	91
3.3 Análise de Consumo Energético com Tenda.....	93
3.4 Resumo e Conclusões do Capítulo.....	98
4. Conclusões e Trabalhos Futuros	101
4.1 Síntese e Análise de Resultados	101
4.2 Conclusões Finais	1045
Referências	1077

Índice de Figuras

Figura 1 - Habitat '67 de Moshe Safdie	3
Figura 2 - Furniture House de Shigeru Ban.....	3
Figura 3 – Pavilhão IBM de Renzo Piano.	4
Figura 4- Eames House de Charles Ray Eames	4
Figura 5 – Comparação do tempo de construção de um projeto tradicional com um projeto modular.....	6
Figura 6- Xstrata Nickel Rim South, Ontário, Canadá.....	7
Figura 7 – Expansão de escritórios da Britco Agassiz	7
Figura 8- Lady Liberty Alliance Chapter School.	8
Figura 9 – Lexington High School.....	8
Figura 10- Mercy Hospital, Joplin, Mo.....	9
Figura 11- Hospital psiquiátrico Veteran Affairs..	9
Figura 12- Starbucks, Marysville, Washington.	9
Figura 13 - The Stack Apartments, Nova Iorque, USA,.....	10
Figura 14- Residência universitária, Manresa, Espanha.....	10
Figura 15- Hotel The Brooks	11
Figura 16- Residências Universitárias, Holanda	11
Figura 17- Hotel Uxbridge, em Inglaterra.....	12
Figura 18 - “OceanScope”, Edifício Público, na Coreia do Sul.....	12
Figura 19- Quik House, 2009	12
Figura 20- Edmonds School District.....	14
Figura 21- Serviços administrativos escola St. John’s	15
Figura 22- Escritório de vendas, em Burnary, British Columbia.....	15
Figura 23- Winston Medical Center.....	16
Figura 24- Posto de Segurança	16
Figura 25- Armazenamento de camaras hiperbáricas	17
Figura 26- NYC Urban Housing Prototype.	17
Figura 27- Contentor marítimo convertido em escritório provisório	18
Figura 28- Painel SIP	19
Figura 29- Gemma Observatory	20
Figura 30- Volume representativo da zona ocupada	21
Figura 31- Relação entre os índices associados a abordagem analítica, PMV e PPD.....	25
Figura 32- Cinco princípios básicos a aplicar para uma construção passiva	30
Figura 33- Esquema resumo dos critérios necessários para a inovação da construção pré-fabricada modular	36
Figura 34- Camadas que compõem os elementos construtivos.	42
Figura 35- Sistema AVAC selecionado para a localização de Lisboa, Portugal.....	46
Figura 36- Sistema AVAC selecionado para a localização de Helsínquia, Finlândia.	51

Figura 37 – Exemplo de Código de acordo com a nomenclatura criada.....	52
Figura 38- Número de conjuntos de parâmetros possíveis, variando os parâmetros: localização, orientação, nº de janelas e tipo de atividade metabólica.	53
Figura 39- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de verão, para a localização de Lisboa, Portugal.....	59
Figura 40- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de inverno, para a localização de Lisboa, Portugal.	59
Figura 41- Nova performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de verão, para a localização de Lisboa, Portugal.	61
Figura 42- Nova performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de inverno, para a localização de Lisboa, Portugal.	61
Figura 43- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de verão, para a localização de Helsínquia, Finlândia.	62
Figura 44- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de inverno, para a localização de Helsínquia, Finlândia.....	63
Figura 45 – Comparação dos valores associados ao consume anual de eletricidade, entre a tipologia 1.1 e 1.2, para efeitos de climatização na localização de Lisboa.	65
Figura 46- Comparação dos valores associados ao consume anual de eletricidade, entre a tipologia 1.1 e 1.2, para efeitos de climatização na localização de Helsínquia.	67
Figura 47 – Definição das dimensões e disposição aberturas.....	68
Figura 48- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LNS3E e HNS3E.....	70
Figura 49- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LNS5G e HNS5G.	71
Figura 50- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LEO5E e HEO5E.	71
Figura 51- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LEO3G e HEO3G.	72
Figura 52- Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros LNS3E e LEOS3E.	73
Figura 53 - Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros LNS3G e LEO5G.	74
Figura 54- Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros HNS3G e HEO3.	74
Figura 55- Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros HNS3E e HEO3E.....	75
Figura 56- Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros LNS3E e LNS5E.	77
Figura 57 - Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros LEO3G e LEO5G.....	77

Figura 58- Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros HNS3G e HNS5G.....	78
Figura 59- Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros HEO3E e HEO5E.	78
Figura 60 - Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros LNS3E e LNS3G.....	80
Figura 61- Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros HNS3E e HNS3G.	80
Figura 62- Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros LEO3E e LEO3G.	81
Figura 63- Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros HEO3E e HEO3G.....	81
Figura 64 – Camadas que constituíntes do pavimento, com a sugestão de melhoria.	84
Figura 65 – Performance da construção modular, para dois dias numa semana de verão, para a situação de referência.	85
Figura 66- Performance da construção modular, para dois dias numa semana de verão, para a situação de melhoria.	85
Figura 67- Performance da construção modular, para dois dias numa semana de inverno, para a situação de referência.	86
Figura 68- Performance da construção modular, para dois dias numa semana de inverno, para a situação de melhoria.	86
Figura 69 – Número de horas de desconforto tendo em conta a situação de referência..	88
Figura 70– Número de horas de desconforto tendo em conta a situação de melhoria....	89
Figura 71- Criação da estrutura da tenda com recurso à ferramenta Component Block...	92
Figura 72- Criação da estrutura da tenda com recurso à ferramenta Plenum.	93
Figura 73 – Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no verão, para Lisboa, Portugal.....	96
Figura 74 - Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no inverno, para Lisboa, Portugal.....	96
Figura 75- Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no verão, para Helsínquia, Finlândia.	97
Figura 76 - Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no inverno, para Helsínquia, Finlândia.	97
Figura 77 – Comparação dos valores totais do consumo energético anual, para efeitos de climatização, para a localização de Lisboa, Portugal.....	103
Figura 78- Comparação dos valores totais do consumo energético anual, para efeitos de climatização, para a localização de Helsínquia, Finlândia.	103

Índice de Tabelas

Tabela 1- Relação entre PMV e sensação térmica	24
Tabela 2- Classe Energética de edifícios	34
Tabela 3- Caracterização do material fenólico,	42
Tabela 4 - Caracterização do painel de fibras de madeira compactada	42
Tabela 5- Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação. [m ³ /(hora.pessoa)]	44
Tabela 6- Perdas de carga.....	48
Tabela 7- Classes de Inércia Térmica.....	56
Tabela 8- Cálculo da massa da camada constituída por madeira compactada.	57
Tabela 9- Cálculo do valor da inércia térmica da construção modular.....	58
Tabela 10-Consumo Energético anual, tipologia 1.1, para Lisboa.	65
Tabela 11- Consumo Energético anual, tipologia 1.2, para Lisboa.	65
Tabela 12- Consumo Energético anual, tipologia 1.1, para Helsínquia.....	66
Tabela 13- Consumo Energético anual, tipologia 1.2, para Helsínquia.....	66
Tabela 14- Consumo energético anual, para os conjuntos de parâmetros associados à localização de Lisboa.	69
Tabela 15- Consumo energético anual, para os conjuntos de parâmetros associados à localização de Helsínquia.....	69
Tabela 16- Consumo energético anual, em função da variação da orientação, para os conjuntos de parâmetros.	73
Tabela 17- Consumo energético anual, em função da variação do número de janelas, para os conjuntos de parâmetros.....	76
Tabela 18- Consumo energético anual, em função da variação do tipo de atividade metabólica, para os conjuntos de parâmetros.	79
Tabela 19-Valores de referência do consumo energético, no verão, para Lisboa e Helsínquia.	94
Tabela 20- Valores de referência do consumo energético, no inverno, para Lisboa e Helsínquia	94
Tabela 21- Valores do consumo energético, no verão, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do Component Block.	94
Tabela 22- Valores do consumo energético, no inverno, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do Component Block.	94
Tabela 23- Valores do consumo energético, no verão, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do Plenum.....	95
Tabela 24- Valores do consumo energético, no inverno, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do Plenum.....	95

~

Lista de Siglas

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AQS	Águas Quentes Sanitárias
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAEAQ	Consumo Anual de Eletricidade para Aquecimento
CAEAR	Consumo Anual de Eletricidade para Arrefecimento
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAV	<i>Constant Air Volume</i>
CEAQ	Consumo de Eletricidade para Aquecimento
CEAR	Consumo de Eletricidade para Arrefecimento
CEN	Comité Europeu de Normalização
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
CMP	Construção Modular Permanente
DIY	<i>Do it Yourself</i>
DOAS	<i>Dedicated Outside Air System</i>
ER	Edifício Recolocável
EPS	Poliestireno Expandido
HPL	<i>High-pressure Laminate</i>
ICT	Índice de Conforto Térmico
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MBI	<i>Modular Building Institute</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i>
OBS	<i>Oriented Strand Board</i>
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
PHI	<i>Passive House Institute</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PVC	Policloreto de Vinil
QAI	Qualidade do Ar Interior
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
UTA	Unidade de Tratamento de Ar

VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i>
XPS	Poliestireno Extrudido

1. Introdução

1.1 Contextualização

As aplicabilidades das construções modulares dentro da área habitacional, são vastas. Ao longo da História, verificou-se que, ao nível da habitação, este tipo de construção foi utilizado como recurso para realojar vítimas das guerras, para solucionar problemas de ordenamento de território e, ainda, para proporcionar habitação sem constrangimentos muito longos, em zonas residências urbanas de grandes cidades. A aplicabilidade das construções modulares pode estender-se, ainda, à construção de hotéis e residências universitárias. Neste sentido, com a possibilidade de poder ser aplicada aos mais variados fins, questiona-se a possibilidade de a construção modular ser desenvolvida como sendo um produto industrial que cumpra os requisitos impostos e desempenhe a função de anexo, ou seja, a função de um anexo climatizado a uma habitação permanente, sendo o utilizador a decidir o fim concreto a que se destina.

Na sequência do projeto BRICKITSMART – desenvolvimento de um módulo de construção modular, surge, então, a necessidade relacionar os requisitos impostos a este mesmo módulo e avaliar a eficiência energética e o conforto higrotérmico das propostas das soluções construtivas a serem consideradas. Assim, sabendo por base que o módulo prevê ser um produto modular, com função de anexo sem AQS, com requisito de durabilidade e fiabilidade, fácil de montar e que pretende promover uma sensação de bem-estar no seu interior, torna-se fundamental relacionar a solução construtiva proposta para a construção modular com o seu projeto energético. Desta forma, será possível que ao longo do processo de desenvolvimento do produto seja necessário fazer alguns ajustamentos quer ao nível estrutural, quer ao nível energético com vista à obtenção de um produto completamente funcional, ou seja, que possa ser adaptável de acordo com cada situação e possa, também, ser habitável.

O desenvolvimento do presente projeto energético deste módulo de construção modular surge à posteriori do trabalho já realizado pela Eng^a. Mafalda Varela e pelo Eng.^o Nuno Silva, nas suas respetivas dissertações, com vista à análise de algumas das soluções construtivas estruturais, propostas por ambos, mas, agora, numa perspetiva energética (Silva, 2017; Varela, 2015).

1.2 Objetivo Geral do Trabalho

O presente trabalho, tem como objetivo, garantir que o produto em desenvolvimento desempenhe, de forma eficiente, as funções para o qual está previsto, ou seja, permita a criação de um espaço interior habitável, passível de ser utilizado para qualquer tipo de atividade (escritório, ginásio, etc.), cumprindo os requisitos do cliente. Neste sentido, pretende-se adaptar as soluções construtivas sugeridas a um módulo de construção modular, construído anexamente a um edifício de habitação permanente.

O módulo de construção modular, destina-se a um público-alvo que se encontra disperso por locais com características climáticas e geográficas diferentes e que tem de ser consideradas aquando a realização do projeto energético do mesmo. Desta forma, pretende-se o desenvolver o projeto energético de um módulo de construção modular, climatizado, de forma a determinar quais as soluções construtivas que melhor se aplicam a duas condições climáticas distintas, tendo sido escolhidos os climas relativos a Lisboa, Portugal e Helsínquia, Finlândia, que surgem como localizações representativas do clima Atlântico e Nórdico. Para além da variação do fator clima, pretende-se, também, variar de forma extrema o tipo de atividade metabólica realizada no interior do módulo, a orientação e o número de janelas. De forma a poder dar resposta a quais as soluções de adaptabilidade do produto modular que devem ser tidas em conta na perspetiva de otimizar o desempenho energético do módulo.

O *DesignBuilder* foi a ferramenta de simulação dinâmica utilizada para a realização do projeto energético em questão possibilitando a escolha dos outputs mais adequados para a análise e comparação de resultados. A sua base de dados ao nível da caracterização climática de cada uma das localizações, juntamente com a sua base de dados de materiais, constituem uma mais valia na utilização do *software DesignBuilder* para o cumprimento dos objetivos propostos.

Desta forma, o objetivo final deste trabalho é poder dar resposta à seguinte questão: O recurso a ferramentas de simulação dinâmica, como por exemplo o *software DesignBuilder*, permite uma representação virtual da realidade e a construção de um modelo preditivo capaz de ser adaptável aos pressupostos do projeto energético, fornecendo informação fidedigna e importante para futuras decisões ao nível do projeto de desenvolvimento do produto?

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Pré-Fabricados, Construção Modular, SIP

O ponto de partida da revisão bibliográfica realizada, foi a distinção do conceito de construção pré-fabricada e construção modular. Estes dois conceitos nem sempre são fáceis de diferenciar tendo em conta as semelhanças entre si. Desta forma, torna-se importante a sua definição e distinção.

1.3.1.1 Pré-Fabricados

A construção pré-fabricada, engloba a construção de todos os componentes do edifício, que fazem parte de um conjunto final maior (Gibb, 1999). É um processo de produção externa que ocorre em instalações especializadas, em que os vários materiais e sistemas de construção são unidos para formar um componente ou parte de uma instalação final maior (Haas *et al.*, 2000). O tipo de componentes pré-fabricados variam de acordo com o tamanho e complexidade e com base na quantidade de trabalho

necessária para montagem no local. Os componentes podem ser categorizados em quatro tipos, de acordo com o tamanho dos componentes pré-fabricados, do maior para o menor (Schoenborn, 2012):

➤ Estruturas Modulares

Componentes que estão na forma volumétrica e que formam uma parte de um edifício concluído (ou um edifício completo em si), e que, tipicamente, possuem superfícies interiores e exteriores acabadas, figura 1 (Schoenborn, 2012).



Figura 1 - *Habitat '67* de Moshe Safdie (Mosche, 1970).

➤ Estruturas Personalizadas

Componentes que são compostos por uma série de elementos pré-fabricados (janelas, portas, painéis), mas que não encerram espaço útil em si, figura 2. Tipicamente, exigem mais trabalho no local de fabrico, mas será mais barato enviar para o local de montagem de forma compacta (Schoenborn, 2012).



Figura 2 - *Furniture House* de Shigeru Ban (McQuaid, 2003).

➤ Componentes Pré-Fabricados

Refere-se a qualquer conjunto único fabricado na fábrica, geralmente porque não pode ser construído no local de montagem, utilizado para ajudar na velocidade ou na qualidade de construção, figura 3 (Schoenborn, 2012).



Figura 3 – Pavilhão IBM de *Renzo Piano* (Massimo, 1984).

➤ Materiais Processados

Elementos de construção fabricados fora do local de montagem e enviados para o local de construção constituem a maioria dos materiais utilizados na construção nos dias de hoje, permitindo vãos maiores e acabamentos personalizados, figura 4 (Schoenborn, 2012).



Figura 4- *Eames House* de *Charles Ray Eames* (Smith, 2007).

No entanto, para além a definição anteriormente apresentada por *Schoenborn*, há outros autores a proporem, também, definições para o conceito de construção pré-fabricada (Kelly, 1951). Assim, segundo o Instituto e o Departamento do comércio dos Estados Unidos, “Uma casa pré-fabricada é aquela que tem paredes, divisórias, pisos,

tetos, e/ou telhado composto por seções ou painéis que variam em tamanho, que foram fabricados em fábrica antes da montagem na fundação do edifício. Isto, contrasta com a casa construída convencionalmente que é construída peça por peça no local.” (Manufacturers Institute, 1947). Por sua vez, Howar Fisher, propõe uma definição mais específica salientando que “... é uma questão de grau. Para simplificar, e para olhar um pouco para o futuro, se empurrar e encaixar um produto no campo, isso é pré-fabricação. Se misturar, cortar, espalhar, encaixar e remendar, isso não é pré-fabricação. Se a operação de campo for essencialmente montagem, em vez de manufatura, há pré-fabricação. Uma parede de tijolos e gesso, claro, em estratégias fabricados ingredientes, mas tal parede é realmente fabricada no campo. A quantidade de refugos e desperdícios que devem ser limpos e removidos de um canteiro de obras pode ser considerado um índice aproximado do grau de fabricação empregada em qualquer operação de construção, uma vez que os resíduos resultam principalmente de um processo de fabricação, não de um processo de montagem” (Fisher, 1948). De um modo mais geral, define-se como “... um movimento para simplificar a construção, aumentando a proporção de trabalho concluído antes da sua construção.” (Cooper, 1945; Fisher, 1948)

1.3.1.2 Construção Modular

É um processo de fabrico definido pela utilização de pré-fabricado e pré-montagem num local remoto para compor componentes volumétricos (estruturas modulares) que são transportados, como componentes finais de grandes dimensões, para o local da obra (Schoenborn, 2012). O *Modular Building Institute* (MBI) categoriza edifícios modulares comerciais como sendo 60-80% concluídos fora do local antes de serem enviados para um destino final.

Na indústria, os tipos de construção modular podem ser divididos em construções modulares permanentes e edifícios recolocáveis., que estão associados a um conjunto de vantagens (apresentadas mais à frente) e desvantagens na sua utilização. As principais limitações deste tipo de construção surgem, de acordo com Schoenberg, associadas (Schoenborn, 2012; Varela, 2015):

- À percepção negativa do mercado com base em precedentes construtivos;
- Aos elevados custos iniciais agravados pela falta de consciencialização dos clientes acerca das potenciais vantagens;
- Aos diferentes processos de fabrico, de fabricante para fabricante;
- Falta de conhecimento dos processos de produção entre os arquitetos;
- Ao maior nível de detalhe e ao compromisso de tempo exigido antecipadamente para o desenvolvimento dos desenhos necessários ao fabrico;
- A abordagem para a aquisição de trabalho afeta as responsabilidades das partes interessadas;
- Conhecimento de programação necessária para a utilização de máquinas que funcionam como CAM;
- Ao tamanho dos módulos e às limitações do peso com base no método de envio.

- Construção Modular Permanente (CMP)

Fornece um serviço comparável à construção no local, onde os componentes são ligados a uma fundação permanente (Schoenborn, 2012). De acordo com o MBI, as CMP podem ser definidas como método de entrega de construção inovador e sustentável utilizando técnicas de *Lean Manufacturing*, *off-site*, para pré-fabricar soluções de edifícios inteiros, de um ou vários andares, para entregar em secções modulares (MBI, 2015). Os edifícios de CMP são fabricados num ambiente seguro e controlado e podem ser construídos em madeira, aço ou betão. Numa outra perspetiva, o *Sage Policy Group* entende por CMP, edifícios para qualquer finalidade e de partitamente qualquer tamanho que são projetados para durar décadas e permanecer num local específico durante todo o tempo de vida útil (Basu, 2012).

O termo “modular” descreve um método ou processo de construção em que módulos individuais ficam sozinhos ou são montados juntos para formarem estruturas maiores. Ao contrário dos edifícios recolocáveis, estas estruturas destinam-se a permanecer num local durante a duração da sua vida útil, ou seja, permanente (MBI, 2015).

Os benefícios primários associados à utilização de CMP, são (MBI, 2015):

- *Greener* - Reduzido impacte ambiental - menos dano no local, menos exposição do material e menos resíduos;
- *Faster* – Processo de construção simplificado – Em muitos casos, a ocupação ocorre 50% mais depressa do que em situações de construção tradicional, figura 5;
- *Smarter* – Mais eficiente em termos de recursos – utilização mais eficiente de mão-de-obra qualificada e menor desperdício de materiais.

Typical traditional project schedule



Typical modular project schedule



Figura 5 – Comparação do tempo de construção de um projeto tradicional com um projeto modular (MBI, 2015).

Quando se opta por um tipo de construção modular permanente, as quatro etapas características do projeto de construção deste tipo de edifícios são (MBI, 2015):

1. Aprovação do projeto pelo cliente e autoridades reguladoras;
2. Montagem dos componentes do módulo num ambiente controlado;
3. Transporte dos módulos para o destino final;
4. Elevação das unidades modulares, de forma a finalizar a construção do edifício.

A utilização deste tipo de construções pode ser aplicada aos mais variados fins. Como no exemplo, do complexo auxiliar de serviços da exploração mineira em Ontário, no Canadá, projetado pela *Allen and Sherriff Architects*, figura 6. As vantagens associadas a esta solução de construção, dizem respeito ao curto tempo de construção e permitir ter um edifício “verde” (Smith, 2015).



Figura 6- *Xstrata Nickel Rim South*, Ontário, Canadá, (Smith, 2015) .

Ainda na área dos serviços, outro exemplo de aplicação deste tipo de construção, é na expansão dos escritórios da empresa *Britco Agassiz*, que foi feita através de seis módulos, figura 7 (MBI, 2015).



Figura 7 – Expansão de escritórios da *Britco Agassiz*, (MBI, 2015).

Na área da educação, é de salientar o projeto da *Lady Liberty Alliance Chapter School*, onde se recorreu a edifícios do tipo CMP, de forma a tornar o complexo escolar um espaço mais coeso, figura 8 (MBI, 2015).



Figura 8- *Lady Liberty Alliance Chapter School*, (MBI, 2015).

Ainda, na área da educação, segue-se outro exemplo, o do *Lexington High School*, que esteve sujeito a uma intervenção de melhoramento, sendo que, o projeto escolhido para o efeito previu a introdução de módulos de CMP com vista à criação de 15 novas salas de aula, um parque de estacionamento e uma sala de convívio para os estudantes, figura 9 (MBI, 2015).



Figura 9 – *Lexington High School*, (MBI, 2015).

Os CMP podem, também, ser aplicados ao nível de edifícios hospitalares, como é o caso do *Mercy Hospital*, em Joplin, Mo, figura 10. Este exemplo de CMP foi projetado por *Aspen Street Architects* que, após o hospital ter sido demolido por um tornado, com esta solução de construção foi possível restabelecer, o mais rápido possível, o normal funcionamento dos serviços de saúde (Smith, 2015).

No âmbito dos serviços de saúde, é de ter em conta, ainda, o projeto referente ao *Veteran Affairs Psychiatric Hospital*, figura 11. Este projeto consistiu na ampliação dos serviços de saúde utilizando módulos do tipo CMP, fazendo com que, seja possível proporcionar um serviço focado no utente (MBI, 2015).

A empresa *Starbucks*, recorreu, também, a este tipo de construção modular para acomodar uma das suas lojas. A construção deste edifício em *Marysville, Washington*,

num curto espaço de tempo, revelou-se um sucesso, figura 12. *RHL Design group*, foi a empresa responsável pelo projeto.



Figura 10- *Mercy Hospital*, Joplin, Mo, (Smith, 2015).

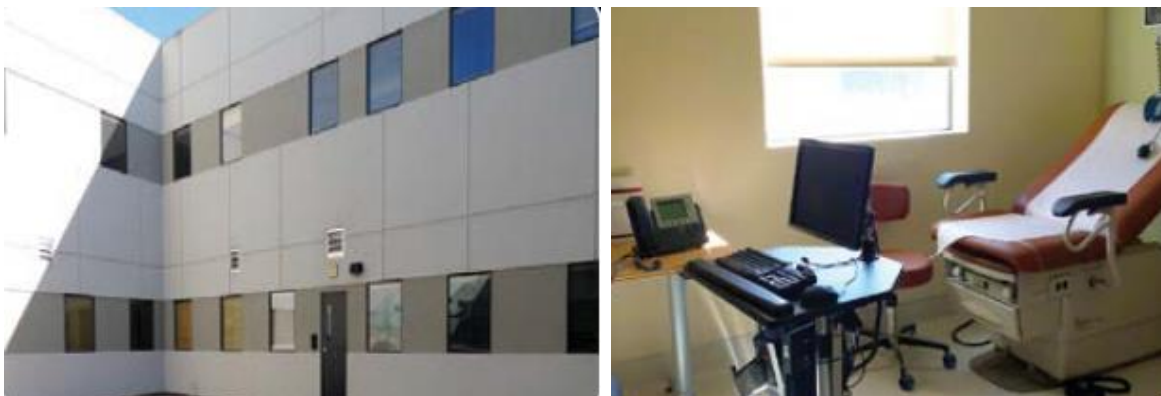


Figura 11- Hospital psiquiátrico *Veteran Affairs*, (MBI, 2015).



Figura 12- *Starbucks*, Marysville, Washington, (Smith, 2015).

Para além dos exemplos apresentados anteriormente, a utilização de CMP pode ser aplicada à habitação. Esta situação está presente num exemplo em Nova Iorque, num complexo de apartamentos, os *The Stack Apartments*, projetados pela empresa *Gluck +*, figura 13. A utilização deste tipo de construção modular, permite que os constrangimentos associados a uma obra, num centro urbano, sejam reduzidos devido ao curto tempo de construção (Smith, 2015).



Figura 13 - *The Stack Apartments*, Nova Iorque, USA, (Smith, 2015).

Outra aplicação deste tipo de construção, no contexto residencial, é na criação de residências para estudantes universitários em *Manresa*, Espanha, projetada pelo arquiteto *Xavier Taragant*, figura 14. Esta solução construtiva foi adotada para que a data de conclusão do projeto pudesse ser cumprida (Smith, 2015).



Figura 14- Residência universitária, *Manresa*, Espanha, (Smith, 2015).

Ainda, no contexto de construção residencial, segue-se o exemplo do hotel *The Brooks*, com 102 quartos, onde os módulos de CMP foram dispostos, de forma a conferir ao edifício um design moderno, por dentro e por fora, figura 15 (MBI, 2015).

As aplicabilidades da construção modular são imensas e direcionadas às mais diversas áreas. A reutilização de contentores marítimos é um exemplo da atribuição de uma nova funcionalidade de um produto em fim de ciclo de vida útil. A inserção de contentores marítimos remodelados, visa aumentar a durabilidade e resistência desta construção (Gomes, 2010). Assim, surgem por todo o mundo, a implantação de CMP em que a unidade modular é resultante de um contentor marítimo. As figuras 16,17, 18 e 19 ilustram a utilização dos contentores marítimos como CMP, em edifícios já construídos.



Figura 15- Hotel *The Brooks*, (MBI, 2015).



Figura 16- Residências Universitárias, Holanda, (Gomes, 2010).



Figura 17- Hotel *Uxbridge*, em Inglaterra (Home, 2019).



Figura 18 -“*OceanScope*”, Edifício Público, na Coreia do Sul (Etherington, 2010).



Figura 19- *Quik House*, 2009 (Kalkin, 2009)

- Edifícios Recolocáveis (ER)

Mantêm a sua mobilidade, servindo funções temporárias para aplicações de construção parcial e total geralmente construído em um chassi integrado com rodas destacáveis, engate e eixos. Enquanto a indústria tem uma história de fornecer soluções temporárias para o local da obra e escolas, a atual tendência é fornecer edifícios duráveis que poderão servir múltiplas funções em todo o seu ciclo da vida. Os módulos estão praticamente completos com acabamentos feitos em fábrica e exigindo trabalho mínimo no local (Schoenborn, 2012). Outra definição para ER é, de acordo com o MBI (MBI, 2015), um edifício parcialmente ou totalmente montado que está em conformidade com a legislação aplicável e é construído numa instalação, usando um processo de construção modular. Edifícios modulares recolocáveis são projetados para serem reutilizados ou reaproveitados várias vezes e transportados para locais diferentes. Ainda com o objetivo de definir o conceito de ER, toma-se a definição apresentada pelo *Sage Policy Group*, ou seja, define-se ER como estruturas projetadas para atender a fins limitados no tempo e para serem reutilizadas e reaproveitadas diversas vezes. Embora estes edifícios sejam projetados para serem movidos de um local para outro conforme as necessidades do mercado, os edifícios são, também, projetados para cumprir com todos os códigos e regulamentos aplicáveis, independentemente da localização ou tipo de utilização (Basu, 2012).

A grande diferença entre os edifícios de construção modular permanente e os edifícios modulares recolocáveis passa pela possibilidade de os ER poderem ser transportados diversas vezes para novas localizações. Um edifício do tipo recolocável será movido, em média, sete vezes ao longo da sua vida útil, sendo que está dependente do tamanho e tipo de unidade modular (MBI, 2015). Por exemplo, um edifício composto por um ou dois módulos, como é o caso das unidades utilizadas como escritórios, podem ser movidas 12 a 15 vezes durante o seu tempo de vida. Já no caso de construções modulares de maiores dimensões só podem ser movidas cerca de três a cinco vezes durante o seu tempo de vida.

À semelhança das CMP, quando se opta por edifícios modulares recolocáveis, há quatro etapas que compõe o ciclo (MBI, 2015):

1. Aprovação do design pelo cliente e autoridades reguladoras;
2. Construção dos módulos num ambiente controlado;
3. Transporte dos módulos para o local de construção, onde a montagem final é completada;
4. Mudança para um novo local para futura utilização ou retorno a instalações qualificadas para ser reaproveitado.

As vantagens associadas à utilização de construções modulares do tipo recolocável são (MBI, 2015):

- Flexibilidade – Flexibilidade e reutilização são os conceitos associados aos edifícios recolocáveis. É comum ter um ER a servir uma grande quantidade de utilizadores durante o seu tempo de vida útil.
- Desenvolvimento Rápido – Nenhum outro tipo de construção permite um tempo de desenvolvimento tão rápido. Por exemplo, em caso de desastres naturais em grande escala, os edifícios recolocáveis podem ser implementados em poucos dias.
- Implantação em Localizações Remotas – Os edifícios recolocáveis não são construídos no local de implantação, mas sim, em instalações controladas. Desta forma, as condições do local de implantação não constituem nenhum problema.
- Maiores Tempos de Depreciação – Comparativamente com as construções modulares permanentes, os ER podem ser considerados propriedade pessoal ou equipamento com tempos de depreciação mais longos.
- Sustentáveis – O facto de o ER ser projetado e construído para ser reutilizado e recolocado em diferentes locais, elimina as necessidades de construir novas estruturas em cada um dos novos locais de implantação.

As construções modulares recolocáveis podem, também, ser aplicadas nas mais diversas áreas. De seguida, apresentam-se alguns exemplos onde este tipo de edifícios foi utilizado.

Na área da educação, toma-se o exemplo da *Edmonds School District*, onde foram instaladas cerca de nove salas de aula ao longo do campus, figura 20. Estes ER foram desenvolvidos pela *Portland State University*.



Figura 20- *Edmonds School District*, (MBI, 2015).

Outra área possível de aplicar este tipo de edifícios é na área administrativa. A utilização de ER como escritórios é relativamente comum, como é o caso dos escritórios

dos serviços administrativos da *St. Johns School*, figura 21. Neste caso, era essencial manter os serviços administrativos em funcionamento durante o tempo de construção da escola.



Figura 21- Serviços administrativos escola St. John's, (MBI, 2015).

Ainda na área de serviços, é comum observar estruturas temporárias perto de novos edifícios residenciais, que funcionam escritórios de vendas. Exemplo deste tipo de ER é o escritório de pré-vendas em *Burnary, British Columbia*, que combina sete módulos que permitem criar o espaço adequado para o cliente, figura 22. A utilização de ER, nesta situação, torna-se uma vantagem, uma vez que, após as vendas estarem concluídas, a estrutura é passível de ser desmontada e reutilizada noutras funções.



Figura 22- Escritório de vendas, em *Burnary, British Columbia*, (Basu, 2012)

Na área da saúde é, também, possível observar alguns exemplos da implantação de ER. No caso do *Winston Medical Center*, este teve de voltar rapidamente a reestabelecer os serviços de saúde após a demolição do edifício original devido à

passagem de um tornado, figura 23. Em nove dias a equipa da *BOXX Modular* foi capaz de instalar uma clínica completamente funcional.



Figura 23- Winston Medical Center, (MBI, 2015).

ER são utilizados frequentemente para situações de acesso e controle, como bilheteiras, postos de segurança, postos de passagem, etc. Exemplo deste tipo de aplicação é a utilização de ER para controlo de passagem, como mostra a figura 24



Figura 24- Posto de Segurança, (MBI, 2015).

O armazenamento de equipamentos é outras das aplicabilidades deste tipo de construção. Ao optar por um ER para esta função, é possível, por exemplo, implantá-lo como armazém junto de locais de construção ou como armazém de produtos químicos. A figura 25 ilustra um ER que serve para o armazenamento de duas camaras hiperbáricas de oxigénio, de forma a providenciar espaço extra ao hospital.

Numa perspetiva mais residencial é, também, possível introduzir ER. Exemplo dessa realidade, foi a criação de um protótipo habitacional, o *NYC Urban Housing Prototype*. Após medidas as consequências da passagem da tempestade Sandy o *New York City Office of Emergency Management* explorou esta aplicabilidade de forma a poder proporcionar de forma rápida, abrigo em caso de desastres naturais, figura 26. ER podem

ser rápida e eficientemente implementados para abrigos de emergência, para cuidados de saúde e educação, ou ainda, para acomodar voluntários e trabalhadores humanitários.

À semelhança dos edifícios de CMP, também as unidades modulares de ER podem surgir de contentores marítimos em fim de vida útil. Em Portugal, a reutilização de contentores marítimos é uma ideia que está associada aos estaleiros de construção, onde são convertidos em: armazéns de material, instalações sanitárias ou escritórios provisórios (Gomes, 2010). A figura 27 ilustra um exemplo de aplicação de um contentor marítimo como ER, para escritório provisório.



Figura 25- Armazenamento de camaras hiperbáricas, (MBI, 2015).



Figura 26- NYC Urban Housing Prototype, (MBI, 2015).



Figura 27- Contentor marítimo convertido em escritório provisório (Gomes, 2010).

1.3.1.3 SIP

A solução construtiva SIP teve origem nos Estados Unidos da América, na década de 50. A sua utilização destina-se, maioritariamente a edifícios para habitação e comércio. Estes são produzidos em fábricas, em ambientes controlados, e são, posteriormente, montados no local final de implantação. Os painéis SIP são constituídos por duas placas OSB e uma EPS, figura 28, e podem variar ao nível da espessura consoante a rigidez estrutural e o isolamento que se pretender, os painéis são, por sua vez, unidos em toda a sua volta por barrotes de madeira o que lhe confere uma rigidez ainda maior. Dentro deste sistema construtivo, pode-se ainda recorrer a outros tipos de isolamento como, por exemplo, a Lã de Rocha, o XPS ou o aglomerado de cortiça (Tuga Business, 2019). Isolantes térmicos como, por exemplo, espumas rígidas de poliuretanos podem também ser usadas, devido à sua melhor proteção contra a humidade, fogo e isolamento térmico, mas geralmente são mais caras.

Relativamente a esta solução construtiva, estão associados, um conjunto de vantagens e desvantagens, à sua utilização. Assim, as principais vantagens associadas aos painéis SIP, são:

- Rapidez de construção;
- Reduzida produção de material de desperdício na produção e construção;
- Envolvente muito isolada minimizando as perdas térmicas para o exterior;
- Possibilidade de serem reciclados, facilmente remodelados, acrescentados;
- Evita-se a criação de caixas de ar com potencial para criação de bolores e condensações.

As limitações subjacentes aos painéis SIP são, por sua vez, as seguintes:

- Limitações de transporte;
- Necessidade de ferramentas especiais em reformulações;
- Impossibilidade de colocar os SIPs em contacto com o solo;
- Necessidade de aplicar um revestimento exterior que proteja o SIP da água;
- O isolamento térmico é normalmente um local onde proliferam micro-organismos;
- Necessidade de se instalar um sistema de ventilação de ar para controlar o número de renovações horárias, em resultado da grande estanquidade associada a este tipo de construção.

Apesar da utilização deste tipo de solução construtiva não ser comum em Portugal, é atualmente o sistema construtivo mais utilizado nos Estados Unidos da América, Canadá e Norte da Europa, pelas suas excelentes características (Tuga Business, 2019). A aplicabilidade deste método construtivo está presente no edifício *Gemma Observatory*, localizado em *New Hampshire*, Estados Unidos, que foi reconhecido com um prémio de arquitetura. A figura 29, ilustra o edifício construído com recurso aos painéis SIP.

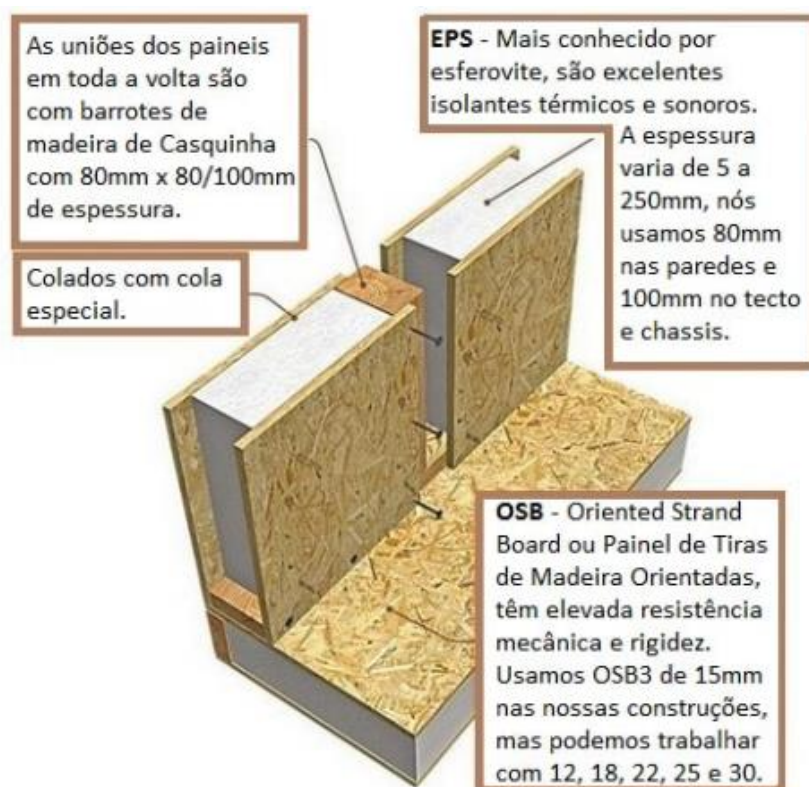


Figura 28- Pannel SIP, (Tuga Business, 2019).



Figura 29- *Gemma Observatory*, (AIA, 2019).

1.3.2 Habitabilidade: Zona Ocupada e Conforto Térmico

1.3.2.1 Zona Ocupada

A zona ocupada pode ser definida como “Espaço de uma sala onde pode ocorrer ocupação humana, geralmente corresponde ao espaço desde o nível do pavimento até cerca de 2m acima deste, retirando meio metro até às paredes.”(Costa Pereira e Vasconcelos Bessa, 2013). Por sua vez, segundo a norma EN 13779, define-se a zona ocupada, como sendo o volume considerado na figura 30, (Departamento de Ar Condicionado, 2014).

A definição do conceito de zona ocupada torna-se importante uma vez que é apenas nesta zona que se devem garantir os valores regulamentares de conforto térmico, garantindo uma boa qualidade do interior (QAI).

Desta forma, entre os vários parâmetros importantes que contribuem para QAI existem quatro, em particular, para que uma boa distribuição do ar seja garantida em todo o espaço ocupado, (Departamento de Ar Condicionado, 2014):

- Velocidade residual do ar entre 0,05 e 0,20 m/s;
- Temperatura ambiente entre 23 e 25°C;
- Humidade relativa entre 40 a 60%;

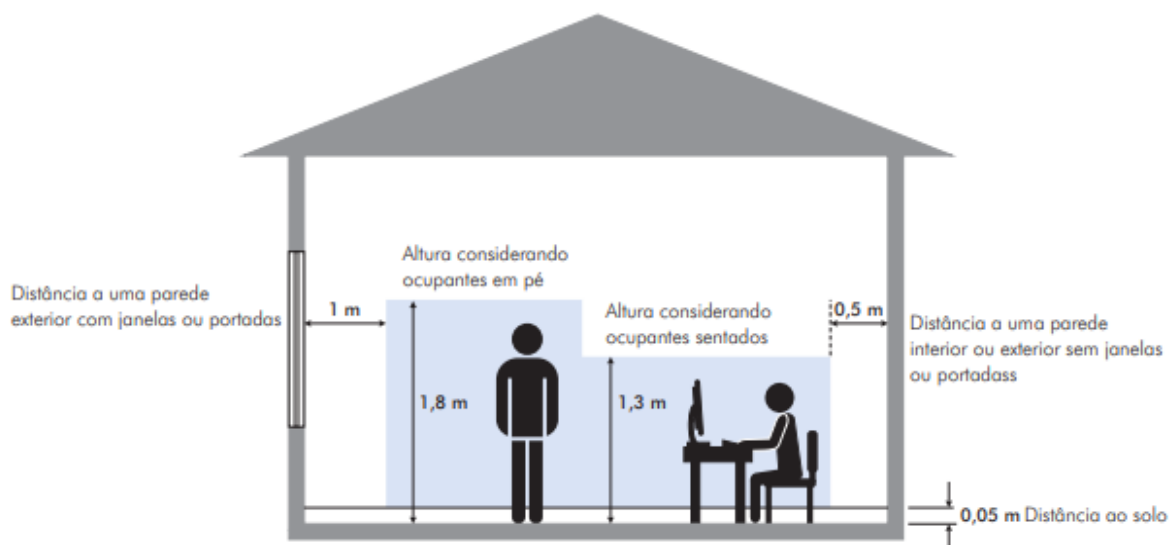


Figura 30- Volume representativo da zona ocupada, (Departamento de Ar Condicionado, 2014).

1.3.2.2 Conforto Térmico

Existem três tipos de sistemas termodinâmicos: abertos, fechados e isolados. Analisando o corpo humano como um sistema termodinâmico, este pode ser considerado um sistema aberto, uma vez que, se realizam trocas de matéria e energia com o meio envolvente, levando a constantes alterações internas do sistema. Considera-se igualmente que o meio envolvente, tem um efeito físico e psicológico em cada indivíduo tornando-o, desta forma, de grande importância para o projeto de edifícios (Oliveira, 2016).

A definição do conceito de conforto térmico não é fácil, uma vez que, pode variar de indivíduo para indivíduo, dado o seu carácter subjetivo que surge como resultado de sensações humanas. Desta forma, uma proposta de definição para este conceito, de um modo mais geral, é *“o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico”* (ASHRAE, 2010). A sensação de bem-estar é dependente do conceito de conforto térmico, ou seja, promove-se o bem-estar de um indivíduo quando este não sente nem calor nem frio. Para que isto se verifique, o sistema termorregulador do corpo humano tem de se encontrar em equilíbrio térmico com o ambiente envolvente, isto é, num dado momento, existe um equilíbrio entre as trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente (Oliveira, 2016). No entanto, atingir o equilíbrio térmico não constitui uma premissa para se alcançar o conforto térmico. Os sistemas de regulação do corpo humano têm a capacidade de proporcionar ao mesmo, a possibilidade de atingir o equilíbrio térmico com o meio envolvente, mesmo que isto se verifique sob condições de desconforto. Assim, dadas as características do corpo humano como sistema biológico, é possível conciliar o equilíbrio térmico do mesmo com o meio envolvente, e proporcionar o conforto térmico, mantendo a temperatura média do corpo humano constante entre o

intervalo de valores de $37,0 \pm 0,8$ °C, independentemente das condições do meio envolvente (ASHRAE, 2009).

Apesar do seu carácter subjetivo, o estudo do conforto térmico revela-se importante a vários níveis durante o projeto de edifícios. Em primeiro lugar, e tal como já foi referido, permite que o indivíduo se sinta confortável termicamente, garantindo uma sensação de satisfação e bem-estar. Em segundo lugar, pode influenciar o desempenho das atividades humanas, ou seja, pode permitir aumentar o seu rendimento quando estas são realizadas em conforto térmico. Finalmente, em terceiro lugar, com o objetivo de evitar gastos desnecessários, quer ao nível energético, quer ao nível monetário com o aquecimento e arrefecimento, é importante ter conhecimento dos parâmetros e condições associados ao conforto térmico do(s) ocupante(s) de um determinado ambiente.

Para determinar o conforto térmico durante a conceção de um projeto, é necessário ter em conta as seguintes variáveis (Oliveira, 2016):

➤ Humanas (dependem do indivíduo):

- Metabolismo – determina a grandeza do calor total a dissipar para manter o equilíbrio térmico;
- Resistência Térmica da Roupa – está associado à grandeza de fluxo de calor dissipado pela porção coberta de pele;
- Aclimação – associada a parâmetros psicossociais.

➤ Ambientais:

- Temperatura do ar ambiente – está associada a todas as trocas de calor sensível por convecção;
- Temperatura média radiante – está associada a todas as trocas de calor por radiação;
- Velocidade do ar – está relacionada com a grandeza dos coeficientes de transferência de calor e massa por convecção;
- Humidade absoluta do ar ou pressão parcial do vapor de água – está associada a todas as trocas de calor latente.

No que diz respeito à primeira variável humana considerada, o metabolismo, esta é uma variável física. A atividade desenvolvida por um indivíduo está relacionada com a quantidade de calor libertada pelo seu organismo. Novamente, ao considerar o corpo humano como um sistema termodinâmico, o calor dissipado do mesmo é resultado da realização de trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente envolvente, sendo que, a quantidade de energia dissipada está dependente da atividade física, que quanto maior, maior é o metabolismo do organismo. Estas trocas térmicas podem ocorrer através de condução, convecção, radiação, evaporação e respiração. Para quantificar a taxa de

metabolismo, utiliza-se o MET, que representa a energia produzida, por unidade de área, de uma pessoa em repouso, sendo que $1 \text{ MET} = 58 \text{ W/m}^2$ (Standardization, 2005).

Relativamente à variável que diz respeito à resistência térmica da roupa, esta funciona como uma barreira para as trocas de calor por convecção criada pela roupa que dificulta, ou seja, cria uma resistência térmica entre o corpo humano e o meio envolvente e é, também uma variável física. A resistência térmica convencional do vestuário, I_{cl} , expressa-se numa unidade denominada de “Clo”, sendo 1 Clo (vestuário típico para inverno) equivalente a uma resistência térmica de $0,155 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$. Essa resistência térmica pode ser obtida pelo somatório da resistência térmica, de cada peça de vestuário que um indivíduo utiliza (Oliveira, 2016; Standardization, 2005).

É devido à existência de variáveis de carácter psicossocial, que o conceito de conforto térmico se torna subjetivo. Estas variáveis dizem respeito a parâmetros como o sexo, idade, raça, hábitos alimentares, peso, altura, adaptação ecológica às regiões, etc, que, por sua vez, condicionam de forma significativa, a percepção de conforto térmico experimentada por um indivíduo num dado ambiente (Oliveira, 2016).

As quatro variáveis ambientais não têm todas a mesma influência nas variações energéticas, sendo que, a temperatura do ar ambiente e a temperatura média radiante, são as de maior importância (Lamberts, 2011).

Relativamente à análise do conforto térmico, pode dividir-se os métodos considerados para o efeito, em duas abordagens distintas: analítica e adaptativa.

➤ Método analítico

Este método, é caracterizado pelos seus índices resultarem essencialmente de estudos que recorrem a câmaras climatizadas, nas quais são ajustados diversos fatores ambientais (temperatura, velocidade do ar, temperatura das superfícies e humidade) procedendo-se, depois, ao registo das sensações térmicas experimentadas pelos indivíduos quando sujeitos, no seu interior, a diferentes combinações das variáveis ambientais (Almeida, 2010).

Os estudos associados aos índices de conforto térmico têm vindo a ser desenvolvidos desde a primeira metade do século XX. Em 1923, foi apresentado o estudo pela AHSVE, como resultado de uma parceria entre *Houghten* e *Yaglou*. Por sua vez, *Yaglou* e *Miller*, em 1925, introduziram novas considerações, que não tinham sido previstas anteriormente, como o efeito da roupa na determinação do índice de temperatura efetiva. No entanto, *Vernon*, em 1932, apresenta uma correção associada ao índice de temperatura efetiva. Esta correção, foi adotada, posteriormente pela ASHRAE, em 1967, e intitulada de temperatura efetiva corrigida – CET. A década de 30, consistiu, também, num período importante para o desenvolvimento do trabalho neste campo, onde se destacaram nomes como o de *Missenard* que estabelece que o índice de temperatura resultante não reflete o resultado de sensações térmicas instantâneas, mas

sim as sensações térmicas após um período de adaptação de cerca de meia hora ao ambiente criado nas câmaras de teste. Ainda no final desta mesma década, Winslow, Herrington e Gagge definem o conceito de temperatura operativa como “*temperatura uniforme de um recinto fictício negro radiante, no qual um indivíduo sofre perdas de calor por radiação e convecção iguais às do ambiente dado*” (Almeida, 2010; Ruas e Labaki, 2009).

À medida que os estudos foram evoluindo, com base na premissa de que para uma dada atividade física desenvolvida (taxa de metabolismo) as únicas variáveis fisiológicas condicionantes do equilíbrio térmico do corpo, logo da sensação de conforto térmico, são a temperatura média da pele e a quantidade de calor perdida pela evaporação do suor e pela respiração, (Fanger, 1970) desenvolveu a equação do balanço térmico, fazendo corresponder o equilíbrio térmico ao valor nulo da taxa de calor acumulada no corpo, também designada, em alguma literatura, por índice de carga térmica (ICT) (Ruas e Labaki, 2009). Na sequência do seu trabalho, Fanger definiu uma escala de sensação térmica de sete níveis, tabela 1, para traduzir o grau de desconforto associado às diferentes combinações das variáveis ambientais e pessoais testadas nas câmaras climatizadas, e um novo índice de conforto, designado por voto médio estimado - PMV (*Predicted Mean Vote*) (Almeida, 2010; Fanger, 1970). A equação 1 traduz este novo índice de conforto, onde M representa a atividade desempenhada pelo indivíduo e S a carga térmica atuante sobre o corpo.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times S \quad (1)$$

Tabela 1- Relação entre PMV e sensação térmica, (Moret Rodrigues, A.; Canha da Peidade, A.; e Braga, A.M. , 2009)

Voto	Sensação Térmica
-3	Muito Frio
-2	Frio
-1	Leve Sensação de Frio
0	Neutralidade Térmica
+1	Leve Sensação de Calor
+2	Calor
+3	Muito Calor

No decorrer do seu trabalho, Fanger propôs um novo indicador, o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), que, por sua vez, era baseado no índice anterior e propunha que se estimasse a percentagem previsível de insatisfeitos (Fanger, 1970). Este indicador, à semelhança do índice de conforto, pode, também, ser traduzido pela equação 2:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (2)$$

A figura 31, ilustra a relação entre os índices associados a abordagem analítica definidos anteriormente, PMV e PPD.

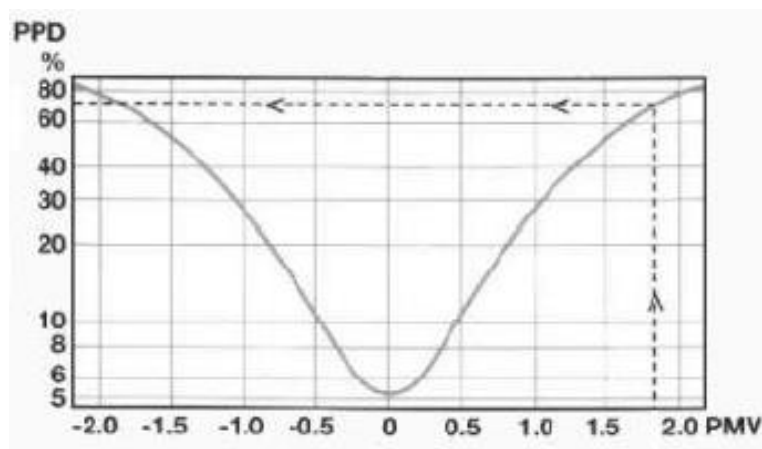


Figura 31- Relação entre os índices associados a abordagem analítica, PMV e PPD.

Com base no gráfico ilustrado pela figura anterior, não é possível atingir um valor de PMV nulo, isto é, $PMV=0$. Devido às diferenças entre indivíduos é impossível especificar condições de conforto que satisfaçam, em simultâneo, todos os ocupantes, haverá sempre uma percentagem mínima de 5% de ocupantes insatisfeitos. Outra conclusão passível de ser retirada com a análise do gráfico, é o facto de o frio e o calor seguirem o mesmo padrão relativamente à sensação de insatisfação com o ambiente térmico. A simetria da curva do gráfico ilustra esta situação.

Esta abordagem da análise do conforto térmico (analítica) derivada das condições de estado estacionário de trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente envolvente foi adotada ao longo das últimas décadas por diversos documentos normativos, destacando-se, atualmente, a norma ISO 7730/2005 que continua a basear a sua análise de conforto térmico, para ambientes interiores moderados, na determinação dos índices PMV e PPD (Almeida, 2010).

➤ Método Adaptativo

Contrariamente ao método analítico, a abordagem adaptativa prevê uma aproximação comportamental baseada na premissa que os utilizadores não são agentes passivos face às condições térmicas oferecidas pelos edifícios que ocupam, promovendo ações (alteração do vestuário, postura, atividade física, manipulação das janelas e dos dispositivos de sombreamento, mudar de local dentro do edifício) que visem atingir as condições que cada um considera adequadas para obterem uma sensação térmica de conforto. Desta forma, destacam-se os nomes de *Humphreys*, *Auliciems* e *De Dear*, pela

publicação de trabalhos nesta área, baseados na observação de pessoas no seu dia-a-dia, ao utilizarem edifícios em condições normais (Almeida, 2010).

Com a evolução dos estudos relacionados com o método adaptativo, dividiram-se os objetos de estudo em dois grupos:

- Edifícios sem climatização;
- Edifícios com climatização.

A base da distinção anterior, assenta no facto de as expectativas dos utilizadores serem diferentes em cada uma das situações.

A da teoria adaptativa, estabelece que ao ocorrer uma mudança de temperatura que produz desconforto, o utilizador reage de maneira a tentar restaurar seu conforto. Desta forma, podem ser apresentadas três categorias de adaptação (Lamberts, 2011):

- Comportamentais: Modificações conscientes ou inconscientes:
 - Ajustes pessoais: roupa, atividade, postura;
 - Ajustes tecnológicos ou Ambientais: fechar/ abrir janelas.
- Ajustes Fisiológicos: Mudanças nas respostas fisiológicas:
 - Adaptações genéticas: herança genética;
 - Aclimação: mudanças inerentes ao sistema termorregulador.
- Percepções e reações das informações sensoriais:
 - Habituação, exposição repetitiva ou crónica, que conduz a uma diminuição da sensação evocada anteriormente.

Apresentam-se as principais normas existentes, na área de conforto térmico em edifícios (Almeida, 2010).

- *ISO 7730:2005 - Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto;*
- *ISO 7726:1998 - Ambientes térmicos - Instrumentos e métodos para medição dos parâmetros físicos;*
- *ISO 8996:2004 - Ergonomia - Determinação da taxa de calor metabólico;*
- *ISO 10551:1995 - Ergonomias de ambientes térmicos - Verificação da influência do ambiente térmico usando escalas subjetivas de julgamento;*
- *ISO 9920:2007 - Ergonomia de ambientes térmicos - Estimativa do isolamento térmico e resistência evaporativa de uma indumentária;*

- *ANSI/ASHRAE Standard 55:2004 - Ambientes térmicos - Condições para ocupação humana;*
- *EN 15251:2007 - Parâmetros ambientais interiores para projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios abordando a qualidade do ar, ambiente térmico, iluminação e acústica.*

1.3.3 Influência e Caracterização do Clima

De acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), o conceito de clima pode ser definido como “*a síntese do tempo e a nossa expectativa sobre as condições meteorológicas.*”. É de notar que o conhecimento do clima de uma região é fundamental para o planeamento e gestão das atividades socioeconómicas, e também essencial para mitigar as consequências dos riscos climáticos. O clima afeta diretamente o conforto térmico, ou seja, afeta a saúde e o bem-estar de um grupo de indivíduos que ocupa um determinado espaço. Desta forma, o estudo do clima é essencial em projetos de edifícios que pretendem alcançar a sustentabilidade e a eficiência energética, uma vez que permite respeitar e aproveitar o que cada tipo de clima oferece no local em que estão inseridos de modo a minimizar o consumo de energia e, ainda, otimizar as condições de ventilação, iluminação e aquecimento/arrefecimento naturais (Pombo, 2016).

Para a caracterização e definição do clima associado às localizações onde está prevista a implantação da construção modular desenvolvida neste trabalho, recorreu-se à classificação climática *Köppen-Geiger*. Esta classificação foi proposta em 1900 pelo climatologista alemão *Wladimir Köppen*. Esta proposta foi aperfeiçoada nas décadas seguintes com a colaboração de *Rudolf Geiger*. A classificação é baseada no pressuposto de que a vegetação natural de cada grande região da Terra é essencialmente uma expressão do clima que nela prevalece. Desta forma, as fronteiras entre regiões climáticas foram selecionadas para corresponder, tanto quanto possível, às áreas de predominância de cada tipo de vegetação. Na determinação dos tipos climáticos de *Köppen-Geiger* são considerados fatores como a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação. Cada grande tipo climático é denotado por um código, constituído por letras maiúsculas e minúsculas, cuja combinação denota os tipos e subtipos considerados (Geiger, 1936). As localizações previstas para a implantação do produto, estudado neste trabalho, são em Portugal (Lisboa) e Norte da Europa (Helsínquia, Finlândia).

De acordo com a classificação *Köppen-Geiger*, a localização de Lisboa, Portugal, diz respeito a um clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente, classificado como Csa. De acordo com o *software DesignBuilder*, há duas estações: a estação de inverno, de outubro a março, em que as temperaturas máxima e mínima, variam entre os 23°C e os 9°C e a precipitação varia entre 68mm e 111mm. É nesta estação que se verifica

o maior valor de humidade relativa, com cerca de 90.7%; a estação de verão, de abril a setembro, em que as temperaturas máxima e mínima, variam entre 28°C e 11°C e a precipitação varia entre 4mm a 64mm (IPMA, 2019; Weather Travel, 2019). No inverno, o vento pode atingir 9,7 m/s.

A localização de Helsínquia, Finlândia, de acordo com a classificação *Köppen-Geiger*, está associada a um clima continental húmido com verões brandos, classificado como Dfb. De acordo com o *software DesignBuilder*, há duas estações: a estação de inverno, de outubro a março, em que as temperaturas máxima e mínima, variam entre os 14°C e os -10 °C e a precipitação varia entre 35mm e 72mm. É nesta estação que se verifica o maior valor de humidade relativa, com cerca de 98.8%; a estação de verão, de abril a setembro, em que as temperaturas máxima e mínima, variam entre 21°C e 3°C e a precipitação varia entre 33mm a 77mm (mateoblue, 2019; weather travel, 2019).

1.3.4 Edifícios nZEB e Climatização Passiva

1.3.4.1 Edifícios nZEB

A um edifício com necessidades quase nulas de energia está associado um balanço energético anual, entre consumo e produção, igualmente quase nulo. Esta é a definição de *nZEB* (*Nearly Zero Energy Building*) que, no entanto, pode ser considerada equívoca, uma vez que, um *nZEB* terá sempre necessidades energéticas, que devem ser respondidas através do recurso de energia proveniente de fontes renováveis, não existindo edifícios com consumo zero de energia. Ou seja, a um *nZEB* é exigido que produza energia suficiente para em termos anuais suprir maioritariamente os seus consumos.

No cálculo da energia consumida por este tipo de edifício, é necessário ter em consideração:

- Climatização;
- AQS;
- Ventilação;
- Iluminação.

O facto de não haver valores fixados para metas e limites de um *nZEB*, consistiu numa limitação deste conceito. Neste sentido, de acordo *Torcellini, Pless e Deru* sugerem-se quatro diferentes tipo de abordagens para a definição dos *nZEB*, que se expressam em indicadores numéricos, energia final, energia primária, custos energéticos e emissões equivalentes de CO₂. Após conhecer cada uma das abordagens anteriores, definem-se as mesmas como (Torcellini, Pless e Deru, 2006):

- *Zero Site Energy* – o balanço energético anual baseia-se no balanço calculado ao nível do limite do local de construção, isto é, a energia total fornecida ao edifício a partir da rede energética tem de ser compensada pela produção de energia do edifício.

- *Zero Source Energy* – o balanço energético anual é contabilizado na fonte, em termos de energia primária. A energia consumida e produzida é multiplicada por fatores de conversão de energia primária.
- *Zero Energy Costs* – o balanço é contabilizado em termos de custos energéticos. Os custos associados à energia importada pelo edifício ao longo de um ano são compensados pela receita gerada da exportação da energia produzida;
- *Zero Energy Emissions* – o balanço é contabilizado em termos de emissões equivalentes de CO₂. O edifício deve compensar as emissões de carbono associadas à energia consumida proveniente de combustíveis fósseis, através da produção de energia de origem renovável, isenta de emissões de CO₂.

Concretamente, em Portugal, relativamente aos edifícios nZEB, até ao momento, e de acordo com o Decreto-Lei n.º 118/2013 (2013) não há definição completa para os valores a seguir.

De forma geral, os edifícios nZEB devem consistir em construções com necessidades de consumo reduzidas devido ao recurso a tecnologias passivas e sistemas de AVAC, iluminação e AQS energeticamente eficientes e, ainda, incorporar sistemas de produção de energia por via renovável ou estarem ligados a centros de produção da vizinhança.

1.3.4.2 Climatização Passiva

O *Passive House Institute*, define um edifício passivo como “... um edifício padrão que é energeticamente eficiente, confortável e acessível ao mesmo tempo.” (Passive House Institute, 2015).

Através da análise da caracterização climática é possível determinar as melhores medidas passivas para o desenvolvimento do projeto energético da construção modular, para cada uma das localizações e assim garantir o requisito, fundamental, de conforto térmico. Fatores como vento, radiação solar e humidade, são os responsáveis pelas necessidades energéticas para aquecimento, arrefecimento e iluminação que quando conjugadas corretamente com as características da construção permitem a redução do consumo elétrico e a contribuição para o conforto térmico desejado. Com o objetivo de minimizar necessidades energéticas é possível, ao projetista, criar vários tipos de soluções e combinações uma vez que cada projeto surge de uma relação de vários fatores dos quais estão dependentes a geometria e orientação tendo sempre por base os mesmos princípios, isto é, ter em consideração a exposição da envolvente, com o intuito de proporcionar o bem-estar dos seus utilizadores (Pereira, 2013). Num edifício energeticamente ideal, os sistemas de aquecimento/arrefecimento seriam desnecessários. A componente passiva seria suficiente para garantir as condições de conforto.

De acordo com o PHI, os cinco princípios básicos que podem ser aplicados à construção de casas passivas, para climas temperados e frios, são (Passive House Institute, 2015):

- Isolamento Térmico - Todos os componentes opacos da cobertura externa da casa são tão bem isolados que possuem um coeficiente de transferência de calor (valor U) de no máximo $0,15 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$;
- Janelas Passivas – As janelas, incluindo a moldura das mesma, não deve exceder um valor de U de $0,80 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$;
- Ventilação para Recuperação de Calor - A ventilação com recuperação de calor, altamente eficiente, resulta, principalmente, do ar interior e serve para poupar energia. Numa casa passiva, pelo menos, 75% do calor do ar de exaustão, resultante de um permutador de calor é fornecido novamente;
- Hermeticidade do Edifício;
- Sem Pontes Térmicas - Todas as ligações devem ser projetadas e executadas com cuidado especial a fim de evitar a existência de pontes térmicas. Nas situações em que as pontes térmicas não podem ser evitadas, devem ser minimizadas o máximo possível.

A figura 32 ilustra os princípios mencionados anteriormente.

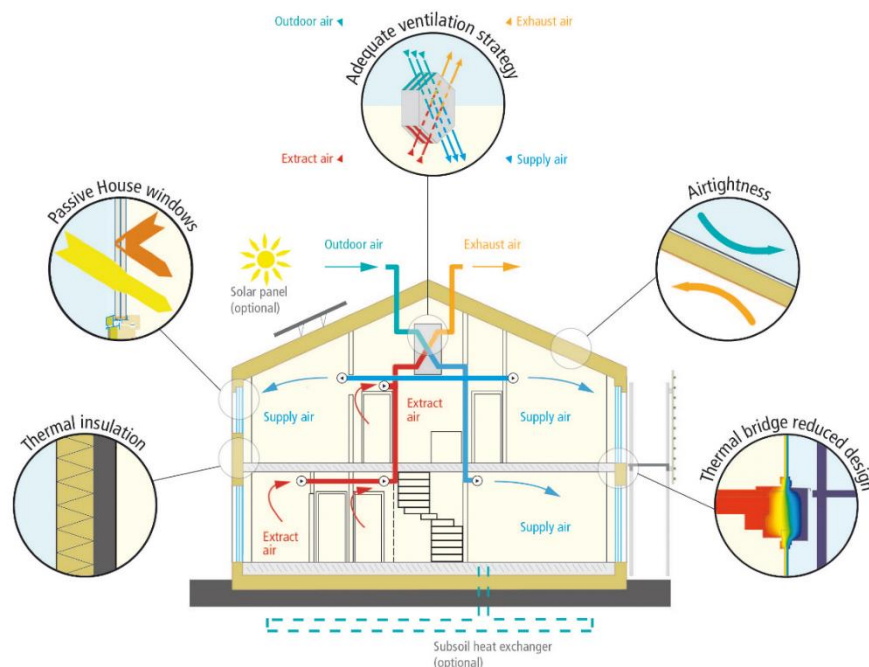


Figura 32- Cinco princípios básicos a aplicar para uma construção passiva, (Passive House Institute, 2015).

As soluções de construção passiva estão, frequentemente relacionadas com o conceito de arquitetura bioclimática que, por sua vez, consiste no projeto dos edifícios, tendo em conta as condições climáticas, utilizando os recursos disponíveis na natureza (sol, vegetação, chuva, vento) para minimizar os impactos ambientais e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo energético (Gama, 2013). Desta forma, os sistemas solares passivos são promovidos pelo recurso a este tipo de arquitetura, que durante a estação de arrefecimento, importa considerar:

- Restringir os ganhos solares por radiação solar através de sombreamentos e proteções solares;
- Impedir que o calor passe por condução através dos elementos construtivos do exterior para o interior;
- Dotar os edifícios de inércia térmica para que eventuais ganhos excessivos durante o dia sejam amortecidos pela massa dos elementos construtivos interiores;
- Potenciar a ventilação natural dos edifícios de modo a que se proceda à dissipação de energia quando a temperatura exterior assim o permitir;
- Potenciar outros meios de dissipação de energia como evaporação e promover superfícies de contacto com o solo.

Por sua vez, na estação de aquecimento, importa:

- Potenciar os ganhos solares diretos através dos envidraçados;
- Dotar os edifícios de elementos que armazenem a energia solar recebida e a restituam para o interior dos mesmos;
- Proteger os edifícios das trocas térmicas por condução com o exterior e de taxas de ventilação excessivas.

Para além dos sistemas solares passivos, outra técnica passiva é o recurso à ventilação natural. Esta técnica, consiste num método que tira partido das diferenças de temperaturas, entre o interior e o exterior e que é, especialmente mais eficaz, durante o período noturno. A ventilação natural permite o arrefecimento do edifício de duas formas distintas (Pereira, 2013):

- Processo térmico, diferenças de temperatura do interior para o exterior;
- Processo eólico, provocado pela conversão do vento, em pressão estática, nas fachadas dos edifícios.

Na estação de aquecimento, pretende-se maximizar os ganhos energéticos. Desta forma, os sistemas de aquecimento passivo visam o seguinte (Gonçalves e Graça, 2004):

- Ganho direto – as massas térmicas desempenham um papel estabilizador das condições interiores, atenuando a amplitude térmica no interior dos edifícios. Quanto maior for a massa térmica, menor será essa variação, sendo que também será mais difícil aquecer o edifício, sendo necessário um equilíbrio entre massa térmica, isolamento e área de vãos, dependendo muito do tipo de edifício e localização do mesmo. Durante o período diurno, a massa térmica absorve o calor resultante da incidência direta da radiação solar e, durante o período noturno, devolve-o ao espaço envolvente;
- Ganho indireto ou desfasado – nestes sistemas, verifica-se um desfasamento da onda de calor transmitida para o espaço e o ciclo da radiação solar. Os espaços onde estes sistemas se encontram podem tirar partido do desfasamento e receber a energia absorvida durante o dia no final da tarde e início da noite, dependendo muito de cada edifício e da sua utilização. Exemplos destes sistemas são a parede de Trombe e colunas de água;
- Ganho isolado – estes sistemas são constituídos por uma superfície de vidro e uma outra absorvedora sem qualquer capacidade de armazenamento térmico. Funcionam em termossifão e permitem ventilar os espaços interiores adjacentes ao longo de todo o ano. Corresponde a um sistema que permite aquecer o ar exterior a insuflar no interior do edifício numa situação de Inverno, utilizando para tal um dispositivo de captação solar. No verão o sistema permite a extração do ar interior.

Por sua vez, na estação de arrefecimento, prevê-se a remoção de energia do interior do edifício, de forma a que a temperatura, no interior dos mesmos, seja reduzida. Os sistemas de arrefecimento passivo são (Gonçalves e Graça, 2004):

- Ventilação natural – quando o ar exterior, em determinados períodos do dia, apresenta uma temperatura inferior à temperatura interior dos próprios edifícios;
- Arrefecimento pelo solo – funciona pela circulação do ar no solo, cujas temperaturas são geralmente inferiores à temperatura do ar exterior, antes de ser admitido no edifício;
- Arrefecimento evaporativo – provocado pela evaporação de água que, para ocorrer, obriga à transferência de calor do ar, originando também o aumento da humidade do ambiente;
- Arrefecimento radiativo – tirando partido da diferença de temperatura radiativa entre a envolvente do edifício e a temperatura do “céu”, durante o período

noturno e através da utilização de um elemento de armazenamento térmico na cobertura.

Aquando o desenvolvimento do projeto de um edifício, recorrendo à componente passiva, existem outros fatores importantes a ter em consideração, que resultam num importante contributo para precaver as necessidades de aquecimento e arrefecimento de um edifício. Os fatores mencionados anteriormente, dizem, diretamente respeito, à caracterização do edifício e representam os seguintes conceitos: localização, forma, orientação, vegetação e sombreamento.

Desta forma, os requisitos técnicos, para que um edifício seja classificado como uma construção passiva, são (Miguel e Abrantes, 2014; Passive House Institute, 2015):

- Necessidade de energia para o aquecimento inferior a $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;
- Necessidade de energia para o arrefecimento igual à situação de aquecimento, com um adicional para a desumidificação;
- Necessidade de energia primária inferior a $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;
- Menos de 0,6 renovações de ar por hora a 50 Pa;
- Quer no verão, quer no inverno, o conforto térmico deve ser tal que o número de horas de desconforto acima de 25°C , não deve ultrapassar os 10%.

Os edifícios passivos são planeados, otimizados e verificados pela *Passive House Planning Package* (Passive House Institute, 2015).

1.3.5 Classe Energética de Edifícios

Analisando o paradigma de Portugal, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) tem, na sua base, o objetivo de apresentar um conjunto de informação relevante sobre o desempenho energético dos edifícios, nomeadamente (AAG - Atelier Alberto Grey, 2019):

- Informar do desempenho energético dos edifícios, classificando-os de modo a que o consumidor final os possa comparar e escolher estes em função da classe energética;
- Apresentar um quadro de medidas de melhoria, identificadas pelo Perito Qualificado, que conduzam à melhoria da eficiência energética, do conforto e da eventual redução dos consumos de energia para diversos fins;
- Identificar as componentes do edifícios e os seus sistemas técnicos, permitindo assim, num único documento, detalhar a informação relacionada com o desempenho energético, que por vezes, não está ao alcance imediato do utilizador do edifício.

Para a classificação energética de edifícios, são consideradas oito classes energéticas que variam de acordo com o valor obtido a partir o rácio do valor das necessidades nominais anuais de energia primária (N_{tc}) e o valor limite regulamentar para as necessidades nominais anuais de energia primária (N_t). É de salientar que as metodologias de cálculo de N_{tc} se encontram no Despacho n.º 15793-I/2013. A equação 3 traduz a relação descrita anteriormente:

$$R_{Nt} = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (3)$$

Com a utilização da expressão anterior é, então, possível determinar a que classe pertence o edifício, de acordo com os valores da tabela 2, sendo que, a classe A+ corresponde a um edifício com melhor desempenho e a classe F corresponde a um edifício de pior desempenho energético.

Tabela 2- Classe Energética de edifícios, (ADENE, 2018).

Classe Energética	Valor de R_{Nt}
A+	$R_{Nt} \leq 0.25$
A	$0.26 \leq R_{Nt} \leq 0.5$
B	$0.51 \leq R_{Nt} \leq 0.75$
B-	$0.76 \leq R_{Nt} \leq 1.00$
C	$1.01 \leq R_{Nt} \leq 1.50$
D	$1.51 \leq R_{Nt} \leq 2.00$
E	$2.01 \leq R_{Nt} \leq 2.50$
F	$R_{Nt} \geq 2.51$

1.3.6 Softwares de sistemas de climatização em edifícios

Durante o desenvolvimento do projeto energético da construção modular, proposta neste trabalho, foi igualmente importante dispor de ferramentas que permitam prever o comportamento térmico do edifício. A utilização de *softwares* de sistemas de climatização de edifícios constitui uma via para a avaliação antecipada do impacto que certas decisões, ao nível do projeto, têm no desempenho energético do edifício. Estas ferramentas, implicam uma simulação dinâmica para a avaliar de forma prospetiva os

consumos de energia futuros, que assentam na base da utilização de medidas passivas para o desenvolvimento do projeto de edifícios energeticamente eficientes.

Os programas normalmente utilizados são acreditados pela norma ASHRAE 140-2004, que procura minimizar as diferenças com origem nos próprios programas de simulação. Esta norma avalia as capacidades térmicas e aplicabilidade de cada *software*. Para tal, são simulados casos teste, em concordância com a norma, permitindo um enquadramento que possibilite a validação dos resultados nas vertentes analítica, comparativa e empírica (Gama, 2013).

Dos *softwares* atualmente acreditados fazem parte: o *EnergyPlus*, integrado no *DesignBuilder*, *TRANSYS*, *HAP 4.31*, *TRACE 700*, *DOE-2*, *CLIM2000*, *CA-SIS*, *Visual DOE 4.1*, *TASE*, entre outros. A versão do programa utilizado na realização deste trabalho foi a *DesignBuilder v.6.01.019*.

O *DesignBuilder* é um *software* desenvolvido no Reino Unido, que permite a criação e avaliação de projetos construtivos. No que diz respeito às especificações técnicas, o *software* prevê o cálculo das cargas de aquecimento e arrefecimento, utilizando o método aprovado pela ASHRAE, implementado no *EnergyPlus*. Os dados meteorológicos de projeto estão incluídos e as cargas podem ser reportadas ao nível da zona, sistema e planta do edifício. O *software* em questão prevê, ainda, a existência de uma extensa gama de *outputs* de conforto, incluindo curvas de distribuição de horas de arrefecimento e sobreaquecimento, critérios de conforto ASHRAE 55, PMV, PPD, CIBSE TM52 e TM59, ASHRAE e CEN e métricas de conforto adaptável. O *DesignBuilder*, permite, também, que os ecrãs de análise paramétrica possam ilustrar o efeito das variações nos parâmetros de projeto, numa série de critérios de desempenho. A maioria das ferramentas deste tipo, utiliza uma abordagem de “*Black Box*” para simulação, o que significa que não há acesso às entradas, saídas e códigos de simulação utilizados para executar as simulações. No entanto, no *EnergyPlus*, é possível ter acesso total ao código (DesignBuilder, 2019a).

1.3.7 Resumo e Conclusões do Capítulo

O conceito de construção modular é antigo e tem vindo a evoluir com o avançar do tempo. Verificou-se a aplicabilidade deste conceito às mais diversas áreas e nas mais diversas situações, em locais distintos e com diferentes funções. As principais vantagens associadas a este tipo de construção, comparativamente com a construção tradicional, estão associadas, essencialmente, à redução dos tempos de construção, bem como à redução do custo global do empreendimento. No entanto, continuam a existir limitações associadas a este tipo de construção, que dizem respeito ao facto de as unidades modulares não poderem ser alteradas em estaleiro, bem como as limitações das soluções ao nível do design e, ainda, às restrições de transporte.

Do ponto de vista energético, o conforto térmico é um requisito fundamental que é necessário ter em conta, uma vez que promove a sensação de bem-estar. Neste

sentido, o desenvolvimento do projeto energético de uma construção modular deve contemplar a caracterização climática do local a ser implantado, bem como deve recorrer a técnicas passivas para promover a concepção e fabrico de um módulo eficiente, do ponto de vista energético. Assim, o desenvolvimento de uma unidade de construção modular energeticamente eficiente deve ser desenvolvida, tendo em conta a caracterização específica de uma determinada localização. A utilização de *softwares* de análise dinâmica, constituem uma medida passiva, que permite o estudo e a análise do efeito da introdução de diversas soluções construtivas, ao nível da eficiência energética e conforto térmico.

Ao considerar a construção modular como um produto industrial, para que este possa ser implementado no mercado com sucesso e seja considerado inovador, deve conciliar uma abordagem orientada a processos, respondendo, simultaneamente, ao contexto ambiental, a uma estrutura organizacional e à capacidade digital e material de fabricação, figura 33 (Smith e Timberlake, 2010).



Figura 33- Esquema resumo dos critérios necessários para a inovação da construção pré-fabricada modular (Smith e Timberlake, 2010).

1.4 Contributo do Trabalho

Partindo dos objetivos inicialmente propostos e da revisão bibliográfica efetuada, estabelece-se, como principal contribuição deste trabalho, o desenvolvimento de um módulo de construção modular base, com função de anexo, que possa ser facilmente adaptado, garantindo o requisito de conforto térmico. Assim, as adaptações a serem feitas visam garantir as características de modularidade do produto e, ao mesmo tempo, o bem-estar do indivíduo e eficiência do módulo.

No sentido de testar as adaptações feitas à construção modular ao nível das especificações das soluções construtivas, para que se adeque às exigências climáticas do local implantação, utilizou-se, como ferramenta de simulação dinâmica, o *software DesignBuilder*. Através deste *software*, foi possível ter em conta perfis de utilização pré-definidos, bem como a caracterização climática considerando localizações finais de implantação da construção modular.

1.5 Estrutura da Dissertação

Inicialmente, foi realizada uma breve revisão bibliográfica acerca do contexto, evolução e conceitos relacionados com o tema da dissertação. Após a conclusão desta etapa, foi, então, possível desenvolver o trabalho com vista à contribuição de algo novo.

Para atingir os objetivos propostos ao nível do projeto energético da construção modular, procedeu-se em primeiro lugar, a uma caracterização geral da mesma onde foram definidas as volumetrias, as tipologias, as aberturas e os materiais constituintes dos elementos construtivos. Ainda nesta caracterização, foram definidos os parâmetros posteriormente analisados, ou seja, localização, orientação, número de janelas e tipo de atividade metabólica. De seguida, foi também necessário definir e descrever os sistemas AVAC selecionados para cada uma das localizações escolhidas. Com estas caracterizações foi então possível proceder à criação de uma metodologia com vista à obtenção dos resultados. Os resultados foram obtidos com base nos outputs disponíveis pelo *software DesignBuilder*. Estes outputs foram, então, indicados e caracterizados com vista ao esclarecimento do seu significado.

Após uma caracterização inicial e global da construção modular, realizou-se um primeiro estudo ao nível da inércia térmica da mesma, uma vez que este foi um fator importante e que pode justificar a obtenção de determinados resultados. Para além desta análise, foi feito um estudo preliminar à performance da construção modular proposta pelo trabalho, para ambas as localizações, numa semana de verão e numa semana de inverno, para avaliar se as considerações feitas e o sistema AVAC selecionado permitem obter resultados fidedignos que correspondam à realidade.

De seguida, após a validação mencionada anteriormente, foi realizada uma primeira análise das tipologias definidas na caracterização da construção modular proposta com vista à determinação das dimensões das janelas que se tornam mais vantajosas. Posteriormente, com a definição das dimensões das janelas, foi possível proceder às restantes análises de todos os conjuntos de parâmetros e proceder a um estudo individualizado e perceber a sua influência ao nível dos consumos energéticos anuais. A análise destes resultados permitiu a sugestão de alguma propostas de melhoria, com vista à otimização dos consumos energéticos.

Finalmente, foi realizado o projeto energético da construção modular proposta inicialmente no trabalho, mas agora, envolvida por uma estrutura representativa de uma

tenda, tendo sido analisados os valores obtidos e comparados com os valores de referência obtidos anteriormente, nas análises efetuadas.

2. Projeto Energético

2.1 Sumário

Nesta secção, visa-se a caracterização de uma proposta construtiva para edifícios modulares e, posterior simulação das diversas combinações possíveis das especificações do produto. Para isso, pretende-se definir uma tipologia inicial que depois irá divergir para duas versões, sendo o elemento diferenciador as dimensões das janelas. Estas tipologias constituem o primeiro conjunto de simulações, de modo a encontrar a melhor solução de dimensionamento das janelas e que posteriormente foi considerado no restante trabalho.

As especificações do produto, surgem subjacentes a questões relacionadas com as dimensões e materiais constituintes do módulo edificado, com a variação da localização e clima da implantação final, o número de janelas e as suas dimensões (a determinar), as orientações possíveis de implantação e ainda a distinção do tipo de atividade previsto na utilização da construção modular. O conhecimento destes fatores torna-se um aspeto importante, uma vez que é deles que depende o cumprimento do requisito de conforto térmico do módulo.

A metodologia a seguir, será apresentada com vista à obtenção dos resultados necessários para a elaboração de conclusões. Salienta-se, o desenvolvimento de uma nomenclatura que prevê simplificar a identificação e análise dos resultados obtidos e que está de acordo com a metodologia prevista. O recurso ao *software DesignBuilder* como ferramenta de simulação, permite que se apresentem os indicadores e o seu significado, e associados ao mesmo que se proceda ainda a uma caracterização das soluções de climatização previstas para serem utilizadas na construção de um edifício modular.

2.2 Caracterização da Construção Modular

2.2.1 Dimensões

O dimensionamento da construção modular permite uma caracterização global do produto. No entanto, evidencia-se o estudo de um produto modular, pelo que, todas as dimensões adotadas surgem a partir de uma dimensão base, sendo neste caso, 500 mm. Esta medida padrão, decorre do dimensionamento do elemento construtivo de base, equivalente a um bloco ou tijolo de 500 milímetros de lado e que foi utilizado na definição desta proposta construtiva. Este elemento de base não só influencia as dimensões dos elementos construtivos que juntos formaram o próprio módulo, bem como tem influência, também, nas dimensões adotadas para as aberturas. Desta forma, o módulo assenta nas seguintes dimensões: 2,50m de comprimento, 2,50m de largura e 2,50m de altura (medidas pelo interior). Cada elemento construtivo (edifício base) é, então, constituído por vinte e cinco de blocos de 500x500 mm, altura e comprimento, e que montados e ligados entre si permitem formar a parede, a cobertura e o pavimento, nas dimensões mencionadas anteriormente. O módulo base edificado resulta num

formato simples de um cubo, podendo-se classificar a cobertura da construção modular como uma cobertura plana. É de notar que o requisito da modularidade permite, caso seja necessário, aumentar a espessura das paredes tanto quando o desejado, sendo que, para o efeito, basta proceder à montagem dos blocos de forma a formarem duas paredes juntas e lado a lado.

2.2.1.1 Tipologias

Um produto modular assenta na base de que a modularidade resulta da utilização de um conjunto de elementos padronizados em termos de dimensões, de flexibilidade e variedade em uso e pode ser definida pelo tipo de arquitetura de produto, e a sua composição por módulos e as interações entre estes (Relvas, 2017). Tendo em conta as dimensões base definidas anteriormente, surge uma tipologia inicial associada à combinação de módulos. Assim, a construção modular pode ser utilizada de forma isolada, bem como de forma combinada, sendo que a combinação entre módulos é possível, mas não está prevista a sua sobreposição vertical, ou seja, não é possível a sua utilização com vista à obtenção de um edifício com mais do que um andar.

A tipologia inicial utilizada neste trabalho está associada à combinação de quatro módulos que perfazem um espaço interior único com uma volumetria de 5,00x5,00x2,50 metros (medidas interiores). Estas são por sua vez, as dimensões consideradas para efeitos de simulação com vista à utilização do módulo edificado com a função de anexo. Dadas as dimensões mencionadas e a função a que se destina o módulo, fixou-se a ocupação do edifício como sendo de quatro pessoas.

Após a definição da volumetria do edifício é então possível estabelecer quais as dimensões possíveis para as janelas. Tal como já foi mencionado, as dimensões das janelas surgem, também, condicionadas pelo valor modular de referência. Desta forma, surgem duas versões da tipologia:

- **Tipologia 1.1** - consiste na versão em que as janelas têm como dimensões 1,00x1,00 m e a porta 2,50x1,00 m (0,80x0,80m úteis para as janelas e 2,20x0,80 m úteis para a porta);
- **Tipologia 1.2** – consiste na versão em que as janelas têm como dimensões 1,50x1,00 m e a porta mantém 2,50x1,00 m (1,20x0,80 m úteis para as janelas e 2,20x0,80 m úteis para a porta).

2.2.2 Aberturas

As aberturas previstas para esta proposta de edifício modular dizem respeito a uma porta, já dimensionada, e a um número de janelas que estarão sujeitas, mais à frente, a um conjunto de simulações com vista à sua quantificação, tal como já foi

referido. Apesar da possível variação das dimensões da construção modular devido à combinação de vários módulos, apenas se considera uma porta. No entanto, o mesmo não acontece com o número de janelas. O número de janelas a ter em conta pode variar e depende de dois fatores: do local específico da implantação e da dimensão final da construção modular.

Caso a construção modular esteja prevista para um local onde a parede paralela à parede da porta esteja em contacto, por exemplo, com um muro, esta não deverá conter nenhuma abertura. Tendo em conta esta consideração e relacionando-a com as dimensões definidas é, então, possível que o número de janelas da construção modular possa variar entre duas, três ou cinco. Mais concretamente, se a construção modular tiver como dimensões 2,50x2,50x2,50 m, o número de janelas podem ser duas ou três, se a construção modular tiver como dimensões 5,00x5,00x2,50 m, o número de janelas pode variar entre três e cinco.

A par do dimensionamento das aberturas, consideram-se, para Lisboa, vidros duplos azuis de 6mm, com uma caixa de ar de 13mm e uma caixilharia de 10 cm, com uma coeficiente de transmissão térmica, U , de $2,708 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, para as janelas e porta. Por outro lado, para Helsínquia, consideram-se, vidros duplos cinzentos de 6mm, com uma caixa de argon de 13mm e uma caixilharia de 10 cm, com uma coeficiente de transmissão térmica, U , de $2,549 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, para as janelas e porta. Associado às aberturas, foi acionado um sombreamento interior, que funciona com base na temperatura interior (valor de controlo).

2.2.3 Materiais

Para o desenvolvimento do projeto energético de um edifício é essencial o conhecimentos dos materiais que o constituem. Neste sentido e após a caracterização das dimensões e formato da construção modular é possível evidenciar que a mesma é constituída por quatro painéis verticais que constituem as paredes e por dois painéis horizontais que dizem respeito, por sua vez, à cobertura plana e ao pavimento.

Devido ao requisito de modularidade do produto, os elementos da construção modular, mencionados anteriormente, serão todos compostos pelos mesmos materiais. Desta forma, todos serão constituídos por painéis semelhantes aos do tipo SIP, com três camadas, sendo que a camada de acabamento exterior diz respeito a um material fenólico do tipo HPL. A camada de isolamento térmico, camada intermédia, corresponde ao material XPS e a camada de acabamento interior corresponde ao painel de fibras de madeira compactada (englobado na classe dos painéis MDF). As camadas descritas correspondem a uma espessura de 8, 104, 8 mm, respetivamente, como ilustra a figura 34, perfazendo uma espessura total de 120mm. A escolha dos materiais anteriores como solução construtiva, surge com vista ao cumprimento dos requisitos funcionais do produto, e mais especificamente relacionados com o acabamento da superfície e montagem dos blocos que formam as paredes. Neste sentido, a utilização dos materiais

mencionados permite que a massa associada a cada um dos painéis, seja tal que possibilite a construção do edifício modular por uma pessoa apenas. A espessura total de 120 mm, permite também conferir alguma fiabilidade ao produto ao tornar os elementos construtivos com alguma robustez.

Dos materiais considerados, o XPS, é o único presente na base de dados do *software DesignBuilder*. Neste sentido, é necessária a caracterização do material fenólico, bem como do painel de fibras de madeira compactada. Assim, apresenta-se sobre a forma de tabela os valores associados à condutividade térmica, densidade e calor específico dos materiais mencionados anteriormente, com vista à sua caracterização. Desta forma, a tabela 3 apresenta os valores correspondentes ao material fenólico e a tabela 4, por sua vez, os valores relativos às fibras de madeira compactada.

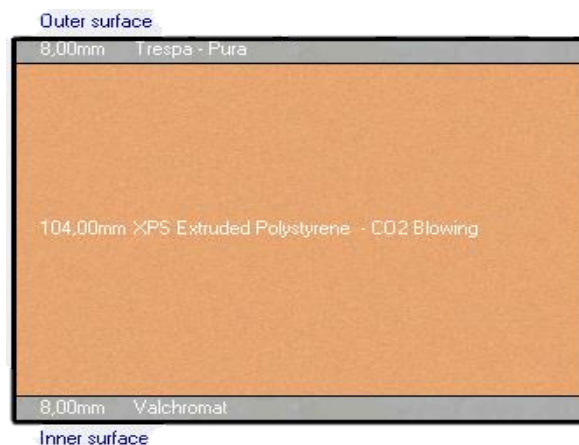


Figura 34- Camadas que compõem os elementos construtivos.

Tabela 3- Caracterização do material fenólico, (MakeltFrom.com, 2019; Trespá, 2019).

Condutividade Térmica [W/(m · K)]	0,15
Densidade [kg/m ³]	1350
Calor Específico [J/(kg · K)]	1250

Tabela 4 - Caracterização do painel de fibras de madeira compactada, (Investwood, 2019; MakeltFrom.com, 2019).

Condutividade Térmica [W/(m · K)]	0,30
Densidade [kg/m ³]	850
Calor Específico [J/(kg · K)]	1700

2.2.4 Localização

O projeto energético da construção modular prevê a sua implantação em duas localizações distintas que no presente trabalho são caracterizadas pelos climas referentes a cada uma delas. Tal como já foi referido, as localizações previstas para a implantação desta proposta de construção modular, correspondem a Lisboa, Portugal e Helsínquia, Finlândia, sendo que, os climas referentes a cada uma são representativos de dois climas com características extremamente diferentes e que foram os considerados para efeitos de simulação.

O clima associado à localização de Lisboa, pretende retratar um clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente, que contrasta com um clima continental húmido com verões brandos, característico de Helsínquia.

Os climas escolhidos são diferentes, fazendo com que a adaptação do ser humano a cada um também seja. Neste sentido, o vestuário em cada uma das situações, no verão e no inverno, é diferente e tem influência na determinação do conforto térmico no interior do módulo construído. Assim, relativamente a ambas as localizações, Lisboa e Helsínquia, para a estação de arrefecimento, verão, considera-se 0,5 *Clo* e 1,0 *Clo*, para a estação de aquecimento, inverno.

As localizações consideradas tem características climáticas bastante distintas. Desta forma, a caracterização do clima associado a Helsínquia, Finlândia, prevê um clima extremo, pelo que, para manter as condições de conforto térmico no interior da construção modular, as soluções construtivas iniciais e de definição do sistema AVAC não podem ser as mesmas que as consideradas para Lisboa. Assim, com vista a criar as mesmas condições ambiente no interior, para Helsínquia foram considerados elementos construtivos duplos, com vista a duplicar a espessura de isolamento. Também o sistema AVAC não poderá ser o mesmo, no entanto, esta situação será abordada mais à frente.

2.2.5 Orientação

A orientação solar de um edifício pode ser vantajosa ao nível da eficiência energética do mesmo, pelo que é um fator a ter em consideração aquando o desenvolvimento do projeto energético. Por exemplo, relativamente a Portugal, sabe-se que o sol nasce a este e se põe a oeste, sendo que a orientação a sul promove os ganhos solares, em oposição à orientação norte. Assim, serão definidas duas orientações distintas, sendo que uma diz respeito a uma orientação norte/sul e a outra a uma orientação este/oeste.

Durante a análise da solução construtiva, a fachada com maior percentagem de envidraçado, isto é, com uma janela e a porta, será a que estará orientada para Sul, na orientação Norte/Sul e para este, na orientação Este/Oeste.

2.2.6 Atividade

O tipo de atividade física é, também, um fator necessário a ter em consideração no projeto energético da construção modular, uma vez que a quantidade de energia libertada pelo corpo humano está relacionada com o tipo de atividade realizada.

De forma a comparar os resultados obtidos a partir das simulações, são definidas, no *software*, dois tipos de atividades bastantes distintas que visam representar duas situações extremas de atividade metabólica. Neste sentido, no *software DesignBuilder*, foi definida uma atividade mais sedentária, ou seja, com menor atividade física, que é representativa de uma situação de escritório. Por outro lado, foi igualmente definida uma situação com maior atividade física, que por sua vez, é representativa de uma situação de ginásio.

De acordo com a Portaria nº 353-A/2013 de 4 de dezembro, é possível a determinação do caudal mínimo de ar novo necessário fornecer para o interior de uma construção modular. A tabela 5 representa o caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devido à ocupação e sabendo que para edifícios novos o limiar de proteção CO_2 é 2250 mg/m^3 , ou seja 1250 ppm. É, no entanto, importante salientar que no decorrer deste trabalho utilizou-se a legislação portuguesa, quer para a localização relativa a Lisboa, quer para a localização relativa a Helsínquia, mas os valores limiar de proteção CO_2 são variáveis ao longo do tempo e dependendo da legislação de cada país.

Tabela 5- Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação. [$\text{m}^3 / (\text{hora.pessoa})$].

Tipo de atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes - M (met)	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [$\text{m}^3 / (\text{hora.pessoa})$]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas.	20
Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de Refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	24
		Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche.	28
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares.	35
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0 a 3,0)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	49
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	98

A partir dos valores presentes na tabela 5 e sabendo que se definiu a ocupação como 4 ocupantes, pode concluir-se que para a atividade de escritório, 1,2 met, o caudal de ar novo necessário é cerca de $80 \text{ m}^3 / \text{hora}$. Por sua vez, para a atividade de ginásio, ou seja, 2,5 met, o caudal de ar novo necessário é $200 \text{ m}^3 / \text{hora}$.

Ao considerar o tipo de atividade a desenvolver no interior da construção modular, são vários parâmetros que podem, também, ser definidos. Relativamente à

iluminação, em ambas as situações, considerar-se-á iluminação LEDs embutida, com $2,5 \text{ W/m}^2$. No entanto, na situação de escritório, será também considerada a utilização de iluminação de secretária com cerca de $0,5 \text{ W/m}^2$ e, ainda, o funcionamento de aparelhos eletrónicos, como, por exemplo, computadores, com cerca de 12 W/m^2 . Na situação de ginásio, considera-se, também, o funcionamento de equipamentos de ginásio, como por exemplo, uma passadeira de corrida, com cerca de 26 W/m^2 (EFLUL, 2019).

Tendo em conta que o produto se destina a desempenhar a função de anexo de um edifício de habitação permanente, salienta-se que o perfil de utilização da construção modular, neste caso, não depende do tipo de atividade considerada. Assim, qualquer que se seja o tipo de atividade selecionada no programa, escritório ou ginásio, o perfil de utilização será o mesmo e é definido como: 10h-12h e 14h-16h, de segunda a domingo.

2.2.7 Soluções de Climatização Seleccionadas

Tal como foi mencionado anteriormente, a localização de implantação da construção modular impede que se possa utilizar o mesmo sistema de climatização em ambas as situações. O clima extremo associado a Helsínquia não permite que o sistema dimensionado para Lisboa seja adotado. Assim, seguidamente serão apresentadas as duas soluções climáticas consideradas para cada uma das situações.

2.2.7.1 Solução de Climatização para Lisboa, Portugal

Tendo em conta as necessidades de climatização da zona ocupada no interior da construção modular, considerou-se a utilização de um sistema VRF com recuperador de calor e DOAS, como solução de sistema AVAC, figura 35.

A estrutura do sistema VRF consiste, tipicamente, numa unidade exterior (compreendendo um ou vários compressores), uma ou várias unidades interiores e tubagem de refrigeração que une a unidade exterior às unidades interiores. Existem, no entanto, três tipos de sistema VRF: sistema só de arrefecimento, sistema com bomba de calor e sistema com recuperador de calor. Como já foi referido, o último mencionado, foi então, o sistema escolhido. Este sistema com recuperador de calor é, por sua vez, um dos mais sofisticados uma vez que o arrefecimento e o aquecimento da zona estão disponíveis em cada uma das unidades interiores, de forma independente ou em simultâneo. No entanto, tendo em conta que o espaço associado ao interior da construção modular é um espaço único, apenas será necessário recorrer a uma unidade interior, pelo que não se verifica a necessidade da existência da possibilidade de aquecimento e arrefecimento simultâneo. Desta forma, quando a unidade interior está em modo de arrefecimento, esta atua como evaporador; quando está em modo de aquecimento, atua como condensador.

De forma a definir o sistema AVAC no *software DesignBuilder*, recorreu-se à versão mais detalhada do programa. Assim, seleciona-se a opção *Detailed HVAC* que permite que o sistema AVAC seja modelado detalhadamente com os componentes do *EnergyPlus*, interligados num *layout* esquemático. A utilização da versão mais detalhada do *software*, para além de permitir a visualização esquemática do sistema, permite, também, o recurso a dados de AVAC detalhados. Com esta opção é, por exemplo, possível ter um intervalo de diferentes valores do ponto de ajuste de aquecimento e arrefecimento configurados para diferentes horários do dia ou do ano, ou seja, o valor do COP de aquecimento e arrefecimento vai variando, ao invés de se manter fixo, como aconteceria na versão simplificada do *software*. Estas variações levam a que os valores obtidos nas simulações sejam mais aproximados à realidade.

A utilização da versão detalhada é facilitada devido à disponibilização de um conjunto de *predefinições* de sistemas AVAC mais comuns. Desta forma, foi possível escolher uma predefinição referente a um sistema VRF com recuperador de calor e DOAS, figura 35. DOAS, diz respeito a um sistema de ar instalado no exterior e, muitas vezes, utilizado com outros equipamentos AVAC. É uma unidade de ar dedicada, que fornece ar externo arrefecido e desumidificado, no verão, e ar externo aquecido, no inverno (Greenheck Fan Corporation, 2019) . A sua utilização pode trazer vantagens ao nível da qualidade do ar interior, uma vez que remove contaminante presentes no ar exterior antes de insuflar o ar para o interior do edifício. Por outro lado, pode ajudar a prevenir problemas relacionados com a humidade, dada a sua boa capacidade de desumidificação do ar e, ainda, pode levar a poupanças energéticas, associada à dissociação da associada ao aquecimento e arrefecimento (Nguyen, 2016).

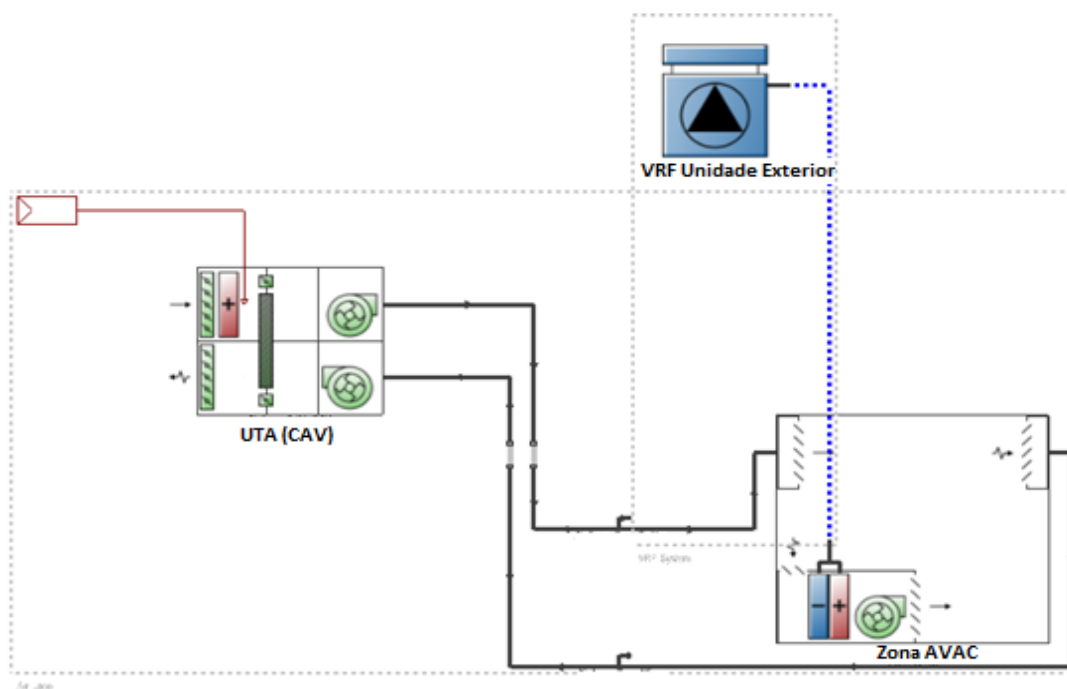


Figura 35 - Sistema AVAC selecionado para a localização de Lisboa, Portugal.

Relativamente à unidade exterior VRF é utilizada para modelar o fluxo variável de refrigerante, que se conecta diretamente à unidade interior VRF da zona, onde estão configurados os condensadores e evaporadores do sistema VRF.

Dentro da zona AVAC, é possível observar a unidade interior VRF, também denominada de unidade terminal, que opera de modo a satisfazer a carga de aquecimento ou arrefecimento da zona, com base na temperatura pré-definida do termostato. A unidade interior VRF é, tipicamente, o primeiro equipamento a operar tanto para o arrefecimento como para o aquecimento, isto é, consiste no equipamento com maior prioridade no esquema de operação da planta do equipamento. No presente esquema representativo da unidade interior VRF, esta é constituída por um ventilador de insuflação que está definido como um ventilador de volume constante, uma vez que a UTA está definida como CAV. Os ventiladores de volume constante operam de forma continuada com base no perfil de utilização, em vez de em ciclos *On/Off*. Para além deste ventilador, a unidade interior VRF é, ainda, constituída por permutador de arrefecimento de arrefecimento e um permutador de aquecimento, sendo que, ambas operam com base em informações de desempenho de condições previamente avaliadas em simultâneo com curvas de desempenho para variações da capacidade total de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. As curvas mencionadas mantiveram-se como *por defeito*, sugerido pelo programa, uma vez que traduzem a informação de forma satisfatória para a presente situação.

Dentro do circuito de fornecimento de ar, definido como constante, salienta-se a existência de uma UTA, que por sua vez é constituída por um ventilador de insuflação, um ventilador de extração (opcional) e uma *resistência* elétrica de aquecimento. Os ventiladores presentes na UTA preveem o mesmo tipo de funcionamento que os ventiladores subjacentes à unidade interior VRF, pois são, também ventiladores de volume constante. Relativamente à *resistência* elétrica de aquecimento, esta fornece apenas aquecimento sensível e tem por base modelos que exigem apenas dados de eficiência, capacidade e de utilização. Para além da UTA, o circuito de fornecimento de ar tem, também neste caso, integrado um DOAS. O controlo de ar exterior fornece ar exterior para a ventilação com opção de arrefecimento livre, sempre que possível. Este equipamento inclui uma série de controlos limite que podem ser definidos pelos ocupantes da zona e, desta forma, se algum destes limites for ultrapassado a taxa de fluxo de ar exterior insuflado é definida para o mínimo.

Os ventiladores que operam a volume constante utilizam a avaliação de eficiência total e um aumento de pressão nominal para calcular o desempenho do ventilador. Assim, no *software DesignBuilder*, para o ventilador de insuflação presente na zona AVAC, definiu-se, com um valor por defeito de 100Pa, o campo associado ao parâmetro *aumento de pressão* e teve-se, também em conta, uma eficiência de 90%. Este valor padrão foi considerado aceitável uma vez que a função deste ventilador é simplesmente permitir a circulação do ar e já prevê a perda de carga associada à filtração de pequenas partículas. Relativamente aos ventiladores presentes na UTA, não foi possível assumir os valores *por defeito* do *software*. Nesse sentido, para o ventilador de insuflação foi

necessário ter em conta as perdas de carga associadas a um filtro G4, um recuperador de calor e um filtro F7, presentes na tabela 6. Este é o ventilador que necessita de vencer maiores valores de perda de carga uma vez que é necessária uma filtração completa do ar exterior. Assim, definiu-se no *software DesignBuilder*, com um valor de 1632Pa, o campo associado ao parâmetro *Pressurização* e teve-se, também em conta, uma eficiência de 90%. Por sua vez, para o ventilador de extração consideram-se apenas as perdas de carga associadas ao recuperador de calor e a um filtro G4, pelo que, no *software DesignBuilder* se definiu o campo associado ao parâmetro *Pressurização* com um valor de 1182Pa e considerou-se uma eficiência de 90%.

Tabela 6- Perdas de carga, (Ramos, 2011; Sodeca, 2018).

	Perda de Carga [Pa]
Recuperador de Calor (100 m ³ /hora)	932
Filtro G4	250
Filtro F7	450

Com os valores mencionados na tabela 6 e sabendo que é necessária uma taxa de renovação de ar de 80 m³/hora ou 200 m³/hora, caso a atividade prevista seja escritório ou ginásio, respetivamente, é possível determinar o valor de *input* da potência elétrica para o sistema de ventilação. As equações 4 e 5 traduzem as relações necessárias à obtenção do valor referido anteriormente.

$$\Delta P = 1000 \cdot SFP \cdot \eta \quad (4)$$

Sendo que:

ΔP – Perda de Carga, [Pa];
 SFP – *Specific Fan Power*, [(W/l) · s];
 η – Eficiência Total de Ventilação.

$$SFP = \frac{P_e}{Q} \quad (5)$$

Sendo que:

P_e – Potência Elétrica do Sistema de Ventilação, [W];
 Q – Caudal Volúmico, [l/s];

Assim, para o caso da utilização da construção modular para o fim de escritório, o valor de *input* da potência elétrica para o sistema de ventilação é 145,07W. Para a situação de utilização da construção modular como ginásio, o valor de *input* da potência elétrica para o sistema de ventilação é, naturalmente superior à situação de escritório, e corresponde a 362,67W.

2.2.7.2 Solução de Climatização para Helsínquia, Finlândia

O clima extremo associado à localização de Helsínquia, não permite que o sistema AVAC dimensionado para Lisboa possa ser adotado. As temperaturas exteriores muito baixas são uma condicionante ao funcionamento do sistema AVAC selecionado anteriormente, podendo levar a que a potência de aquecimento não seja suficiente para que, no interior da construção modular, a temperatura de conforto, definida no *setpoint*, seja atingida. Assim, considerou-se a utilização de um sistema com bomba de calor água-ar com permutador de calor geotérmico.

À semelhança da estratégia seguida anteriormente para definir o sistema AVAC, para Helsínquia, também se recorreu à versão *Detailed* para o definir. Desta forma, a Figura 36 ilustra esquematicamente a solução encontrada para ultrapassar as condicionantes associadas a esta localização. O funcionamento do sistema AVAC, presente na figura 36, divide-se em duas vertentes principais: o circuito do condensador e a zona AVAC. Relativamente ao circuito do condensador este é constituído por dois tipos de circuito, isto é, um circuito de fornecimento de água e outro de requisição da mesma, sendo que, é o circuito de requisição do condensador que fará ligação à zona AVAC. Por outro lado, é no circuito de fornecimento do condensador que estão presentes o *setpoint manager*, a bomba de fornecimento e o permutador de calor geotérmico. O *setpoint manager* tem, então, a função de controlar a temperatura de saída da água do circuito do condensador. Por outro lado, a bomba de fornecimento está definida como sendo de velocidade variável uma vez que o circuito foi, também, definido como de velocidade variável. Uma bomba de velocidade variável é definida segundo caudais mínimos e máximos que são os limites físicos do dispositivo. Se não houver carga no circuito e a bomba estiver a operar de forma intermitente, esta pode, então, desligar. Para quaisquer outras condições em que há carga no circuito, quer a bomba esteja a operar de forma intermitente ou de forma continuada, ela irá operar segundo um caudal entre o mínimo e máximo definidos. Nestes casos, em que a bomba está em funcionamento, o seu funcionamento será condicionado pelos requisitos dos componentes presentes no circuito de requisição do condensador. Por último, o permutador de calor geotérmico pode ter três tipos diferentes: vertical, lagoa ou de superfície. No entanto, nesta situação, foi considerado o vertical. Assim, o permutador de calor geotérmico vertical serve o circuito de fornecimento do condensador em simultâneo com as torres de arrefecimento. É tipicamente constituído por poços verticais (tipicamente, 50m a 100m de profundidade) compostos por tubos hidrónios que contém água que permite trocas de calor com o solo.

A zona AVAC é constituída por uma bomba de calor água- ar que utiliza água no lado de admissão (isto é, água é fornecida para o condensador e/ou evaporador da bomba de calor água -ar). Em suma, o lado de admissão pode ser conectado ao circuito do condensador com um permutador de calor, como na presente situação, com um permutador de calor geotérmico, ou ainda pode ser conectado com um circuito com uma fonte de calor, por exemplo, uma caldeira e de forma semelhante para o arrefecimento. A bomba de calor água -ar é, então, constituída por uma serpentina de aquecimento elétrica, por um evaporador, por um condensador e por um ventilador de insuflação de ar. A serpentina de aquecimento elétrica está associada ao aquecimento sensível unicamente e funciona segundo modelos simples que apenas requerem informação ao nível da eficiência, capacidade e perfil de utilização. Por sua vez, o ventilador mencionado, está definido como de volume variável uma vez que circuito de ar da UTA está definido com VAV.

Para o ventilador de insuflação foi necessário ter em conta as perdas de carga associadas a um filtro G4 e um filtro F7, presentes na Tabela 6, necessários a uma filtração mais rigorosa do ar exterior. Assim, definiu-se no *software DesignBuilder*, com um valor de 700Pa, o campo associado ao parâmetro pressão estática e teve-se, também em conta, uma eficiência de 90%.

Sabendo que é necessária uma taxa de renovação de ar de 40 m³/hora ou 100 m³/hora, caso a atividade prevista seja escritório ou ginásio, respetivamente, é possível determinar o valor de *input* da potência elétrica para o sistema de ventilação. Assim, à semelhança do que foi feito para o sistema AVAC relativo a Lisboa e recorrendo às mesmas expressões 4 e 5, é possível determinar que, para o caso da utilização da construção modular para o fim de escritório, o valor de *input* da potência elétrica para o sistema de ventilação é 62,22W. Para a situação de utilização da construção modular como ginásio, o valor de *input* da potência elétrica para o sistema de ventilação é, naturalmente superior à situação de escritório, e corresponde a 155,56W.

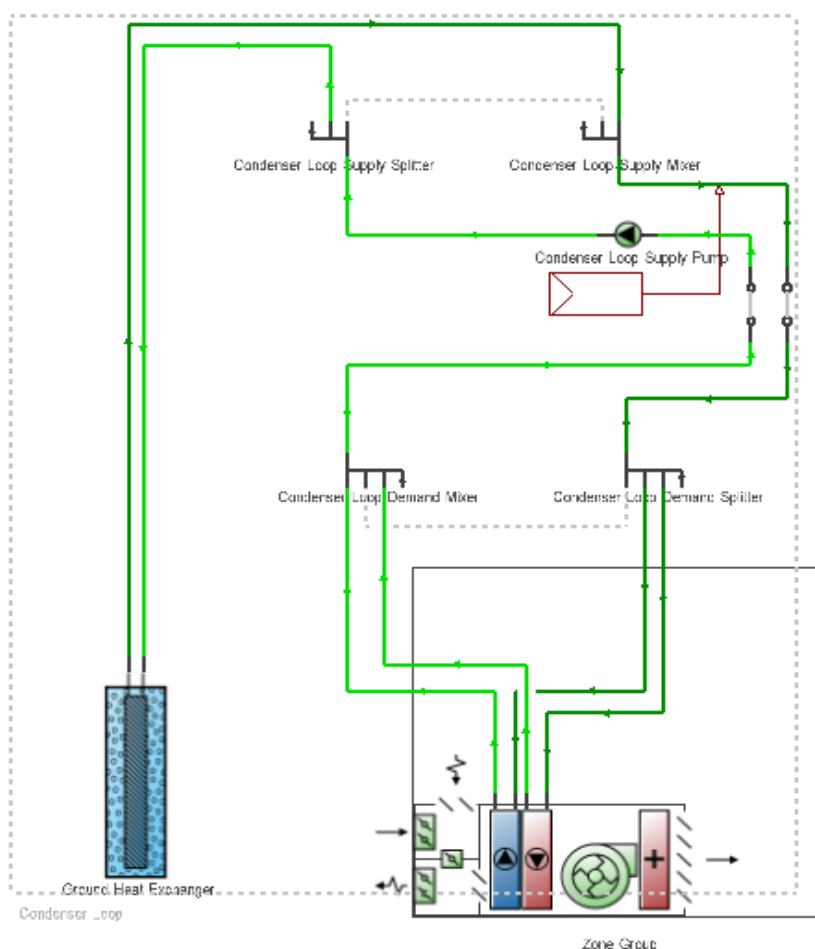


Figura 36- Sistema AVAC selecionado para a localização de Helsínquia, Finlândia.

2.3 Metodologia

Em primeiro lugar, foi realizado um estudo paramétrico, para uma situação em Lisboa e para uma situação em Helsínquia, com vista a determinar se os *inputs* e a definição dos campos no *software DesignBuilder*, ao nível do tipo de atividade, elementos construtivos, aberturas, iluminação e definição do sistema AVAC aberturas, de modo a permitir obter valores considerados representativos da realidade e, desta forma, adotar estas considerações para os restantes conjuntos de simulações. De salientar que para Lisboa, se considerou elementos construtivos simples e o sistema AVAC definido para esta localização e, para Helsínquia, se considerou elementos construtivos duplos e o respetivo sistema AVAC.

De seguida, foram realizadas análises inerentes à escolha das dimensões das janelas, isto é, foram sujeitas a simulações as tipologias 1.1 e 1.2 definidas anteriormente. As dimensões das janelas para as quais se verificaram melhores valores dos parâmetros

associados ao conforto térmico e que previam uma melhor estimativa do consumo energético foram, então, as dimensões consideradas ao longo do restante trabalho e que foram aplicadas, juntamente com os fatores descritos na secção 2.2 deste capítulo.

Considerando toda a caracterização da construção modular feita anteriormente, juntamente com a definição das dimensões das janelas é, então, possível proceder à proposta de uma metodologia com vista à obtenção de resultados. Tal como foi referido, para efeitos de simulação, os parâmetros relativos à localização, à orientação e ao tipo de atividade metabólica são definidos, sempre, com duas possibilidades que visam ser representativas dos dois extremos de cada um. Assim, de forma a ilustrar o número de combinações possíveis, tendo em conta a variação dos parâmetros anteriores, desenvolveu-se uma nomenclatura, figura 37, com base no esquema em árvore, figura 38, que permite seguir, de forma lógica, as simulações a realizar. Com as considerações feitas, é possível obter dezasseis combinações diferentes que foram sujeitas a uma análise da estimativa do consumo energético. No entanto, não foi considerado necessário realizar nenhum estudo ao nível do conforto térmico, uma vez que o sistema AVAC dimensionado garante sempre que o ambiente interior da construção modular confere sensação de bem-estar aos ocupantes.

Com vista a simplificar a apresentação e a análise dos resultados obtidos, surgiu a necessidade da criação de uma nomenclatura intuitiva que permitisse relacionar os valores obtidos, com a respetiva combinação de parâmetros. Assim, tendo por base o esquema em árvore da figura 38, criou-se um código representado por um conjunto de três letras seguidas de um algarismo e uma letra, que permite identificar, facilmente, quais os parâmetros associados a cada simulação. As letras do código correspondem à primeira letra da localização, às letras da orientação e à primeira letra do tipo de atividade realizada. Relativamente ao algarismo, este diz respeito ao número de janelas existentes no edifício de construção modular. De forma, a clarificar a nomenclatura sugerida, apresenta-se o seguinte exemplo, figura 37, criado a partir de um dos ramos do esquema em árvore:

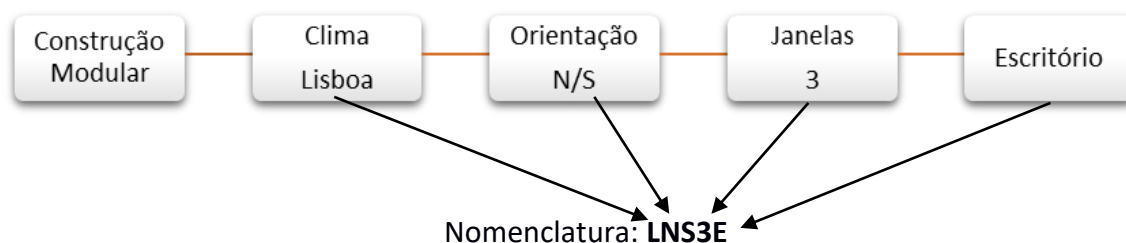


Figura 37 – Exemplo de Código de acordo com a nomenclatura criada.

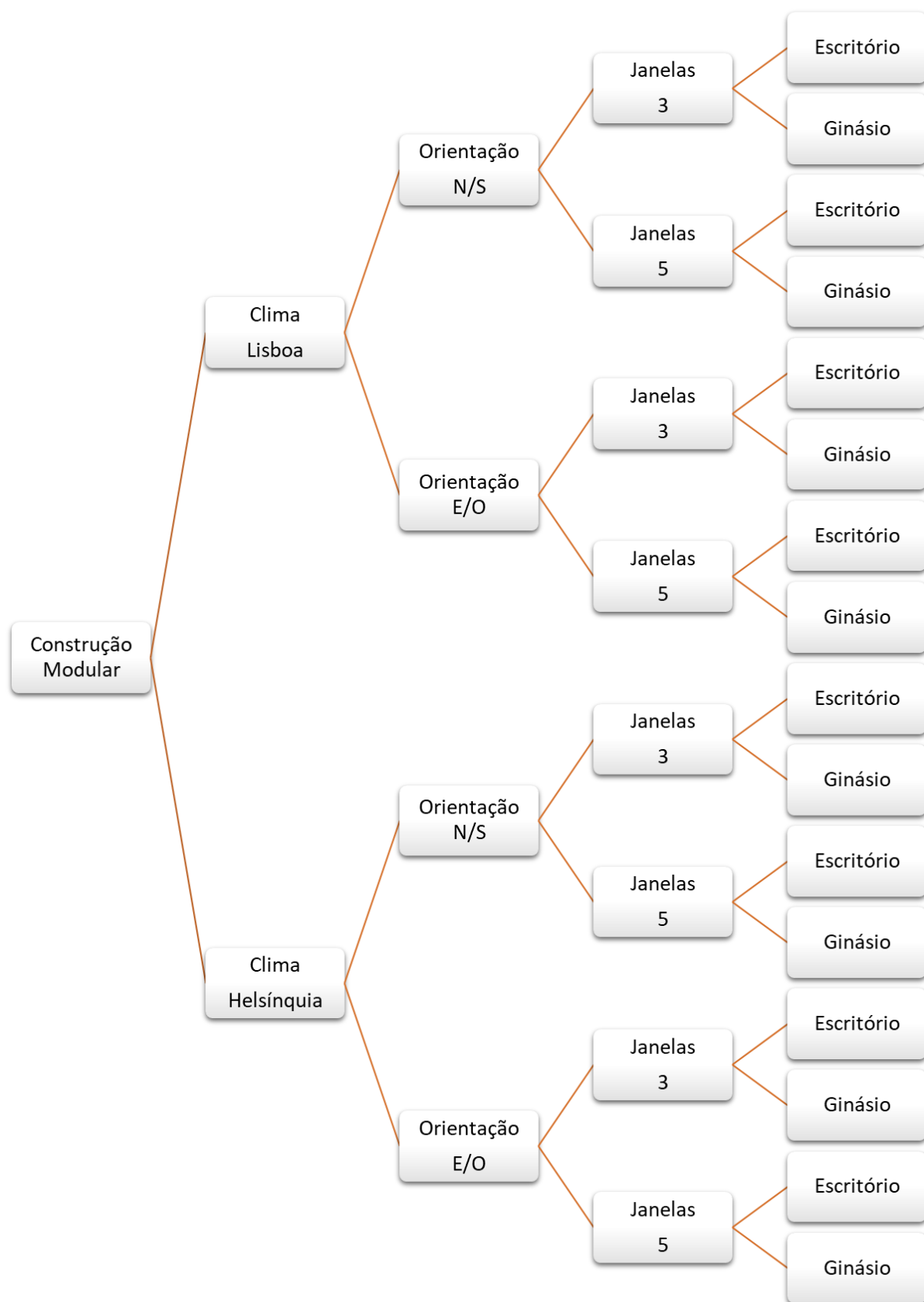


Figura 38- Número de conjuntos de parâmetros possíveis, variando os parâmetros: localização, orientação, nº de janelas e tipo de atividade metabólica.

2.4 Parâmetros

A utilização do *software DesignBuilder* permite obter valores para inúmeros *outputs* que podem ser selecionados de forma personalizável, dependendo dos objetivos de análise de cada projeto. Neste sentido, pretende-se apresentar uma descrição dos *outputs* relevantes e que foram selecionados para análise ao longo do desenvolvimento deste projeto energético (DesignBuilder, 2019).

Ambientais/ Conforto

- Temperatura do ar interior – a temperatura média calculada do ar da zona;
- Temperatura exterior do bolbo seco;
- *Fanger PMV – Predicted Mean Vote* de Fanger, calculado de acordo com a ISO 7730;
- Distribuição de temperaturas – gerar curvas de distribuição de temperatura mostrando os níveis de temperatura “horas a”, “horas abaixo” e “horas acima” em intervalos de 1 °C, durante o período ocupado.

Fluxo de Ar

- Ventilação Mecânica + Ventilação Natural + Infiltrações – soma do ar exterior (em renovações por hora) que flui para a zona através de:
 - Sistema AVAC de distribuição de ar;
 - Infiltrações;
 - Ventilação mecânica;
 - Ventilação natural;
 - Fluxo de ar através de tubos na terra (acionados mecânica ou naturalmente).

Ganhos Internos

- Computadores e equipamentos – Ganho de calor devido a computadores e outros equipamentos;
- Ocupação – ganho sensível devido aos ocupantes. De notar, que pode variar dependendo das condições internas. Com temperaturas muito altas, o ganho sensível pode cair para zero com todos os efeitos do arrefecimento que vão ocorrendo através da transferência de calor latente;
- Ganhos solares através das janelas exteriores – transmissão de radiação solar de ondas curtas através de todas as janelas externas;
- Arrefecimento sensível da zona – é o efeito geral do arrefecimento sensível de qualquer ar introduzido na zona através do sistema AVAC. Inclui qualquer “*free cooling*” associado à introdução de ar exterior frio e ao efeito do aquecimento dos ventiladores presentes. O arrefecimento é sempre apresentado como um ganho de calor negativo. Portanto, não é o mesmo que o consumo de energia da bobine

associado ao arrefecimento quando a ventilação mecânica está envolvida. A melhor forma de classificação é como a de uma contribuição global de arrefecimento do sistema AVAC para o equilíbrio térmico da zona;

- Aquecimento sensível da zona - é o efeito geral do aquecimento sensível de qualquer ar introduzido na zona através do sistema AVAC. Inclui qualquer “*free heating*” associado à introdução de ar exterior frio e ao efeito do aquecimento dos ventiladores presentes. A melhor forma de classificação é como a de uma contribuição global de aquecimento do sistema AVAC para o equilíbrio térmico da zona.

Fluxos de Calor do Sistema

- Recuperação total de calor para arrefecimento – a taxa total de arrefecimento do ar fornecido pelo permutador de calor. Esta taxa é determinada com recurso ao caudal mássico do ar fornecido pelo permutador de calor e pela entalpia do ar que entra e deixa a unidade de tratamento do ar. É obtido um valor positivo se a entalpia do ar baixar com o permutador de calor, caso contrário, a taxa toma o valor zero;
- Recuperação total de calor para aquecimento – a energia total de aquecimento adicionada ao ar fornecido pelo permutador de calor.

Consumo de Combustível

- Aquecimento – consumo total de combustível associado ao funcionamento de geradores de calor, como por exemplo, caldeiras e bombas de calor;
- Arrefecimento – consumo total de combustível associado ao arrefecimento.

Total de Combustíveis

- Eletricidade – Consumo total de eletricidade do edifício.

2.5 Análise da Inércia Térmica da Construção Modular

A definição das dimensões e volumetria da construção modular em conjunto com a definição dos materiais que constituem as paredes, cobertura e laje de pavimento, é de importância extrema. De acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, a quantificação da inércia térmica pode ser determinada a partir da equação 6, que traduz o rácio entre a massa superficial útil e a área de pavimento.

$$I_t = \frac{\sum_i M_{S_i} \cdot r \cdot S_i}{A_p} \quad (6)$$

Sendo que:

I_t – Inércia térmica, [kg/m²];
 M_{S_i} – Massa superficial útil do elemento i , [kg/m²];
 r – Fator de redução da massa superficial útil;
 S_i – Área da superfície interior do elemento i , [m²];
 A_p – Área interior útil de pavimento, [m²].

De acordo com o valor obtido a partir da expressão anterior é, também, possível determinar a classe de inércia térmica do edifício, conforme a tabela 7.

Tabela 7- Classes de Inércia Térmica.

Classe de inércia térmica	I_t [kg/m ²]
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

Para determinar uma estimativa do valor da inércia térmica da construção modular é necessário, em primeiro lugar, definir os tipos de elementos de construção. Desta forma, de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, para a construção modular em estudo, existem cinco elementos de construção, quatro paredes verticais e cobertura, que são do tipo EL1, isto é, são elementos pertencentes à envolvente exterior da construção modular. Existe, ainda, o pavimento que é considerado um elemento de construção do tipo EL2, ou seja, um elemento em contacto com o solo. A definição do tipo de elementos construtivos é necessária uma vez que terá influência no valor da massa superficial útil, M_{S_j} , dos mesmos, bem como na determinação do fator de redução da massa superficial, r .

Para determinar o valor da massa superficial útil dos elementos tem-se por base, novamente, o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. Deste modo, de acordo com o despacho anterior e tendo em conta que ambos os elementos do tipo EL1 e EL2 têm a mesma constituição, ou seja, preveem a existência de uma camada de isolamentos térmico, XPS, e um revestimento interior de madeira compactada, então, o valor de $M_{S_i} = m_i$, sendo que, m_i corresponde à massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior. Desta forma, sabendo o valor da densidade do material associado à madeira compactada e a volumetria associada a esta mesma camada, é possível determinar a massa deste elemento, que ao ser dividida pela área útil do mesmo, possibilita a determinação do valor da massa superficial útil, M_{S_i} . Recorrendo ao

elemento construtivo da cobertura, que prevê uma área útil de 32,81 m², e à equação 7 é, então, possível determinar o valor desejado. A tabela 8 ilustra os valores em questão.

$$m = \rho \cdot V \quad (7)$$

Sendo que:

ρ – Densidade do material, [kg/m³];

m – Massa da camada constituída por madeira compactada, [kg];

V – Volume da camada constituída por madeira compactada, [m³].

Tabela 8- Cálculo da massa da camada constituída por madeira compactada.

Densidade do material, ρ	850 kg/m ³
Volume da camada constituída por madeira compactada, V	0,262 m ³
Massa da camada constituída por madeira compactada, m	222,7 kg

Desta forma, com o valor da massa presente na tabela 8 e sabendo, que a área útil do mesmo elemento construtivo é 32,81 m², então $M_{S_i} = m_i = 6,79 \text{ kg/m}^2$.

Relativamente ao valor do fator de redução da massa, r , segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, depende da resistência térmica do revestimento superficial interior. Assim, para os elementos do tipo EL1 e EL2 da construção modular, o revestimento superficial interior é constituído por madeira compactada, com um valor de resistência térmica, R , de 0,17 (m² · K)/W e, cujo mesmo valor, pertence à gama de valor $0,14 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W} \leq R \leq 0,3 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$, logo o fator de redução da massa, r , toma o valor de 0,5.

Tendo em conta todos os elementos construtivos e os valores anteriormente determinados, é possível organizar na tabela 9, os valores dos parâmetros necessários à quantificação da inércia térmica da construção modular, bem como o seu valor. De notar que para a obtenção deste valor se considerou que a construção modular tem cinco janelas de dimensões 0,80x0,80 m.

Tendo em conta o valor obtido de 12,56 kg/m² e recorrendo à tabela 7, presente no Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, é possível classificar a classe da inércia térmica como fraca. O conhecimento deste valor pode vir a ser, mais à frente neste trabalho, um fator determinante para a compreensão dos resultados a serem obtidos para a análise do conforto térmico e para a caracterização do consumo energético da construção modular.

Tabela 9- Cálculo do valor da inércia térmica da construção modular.

	S_i [m ²]	r	M_{S_i} [kg/m ²]	A_p [m ²]	I_t [kg/m ²]
Parede 1	9,00	0,50	6,79	25,00	12,56
Parede 2	10,50				
Parede 3	11,50				
Parede 4	11,50				
Cobertura	25,00				
Pavimento	25,00				

2.6 Estudo Paramétrico

Nesta secção do trabalho, pretende-se apresentar e analisar o comportamento da construção modular para uma semana na estação de inverno e na estação de verão. O objetivo é perceber se os fatores considerados e definidos no programa *DesignBuilder* permitem obter resultados que correspondam e estejam coerentes com a realidade. Desta forma, é possível realizar todas as simulações com confiança nos campos definidos no programa.

2.6.1 Desempenho do Edifício em Lisboa, Portugal

Com vista à realização deste estudo, irá recorrer-se ao conjunto de parâmetros LEO3E que será sujeito a uma análise dos resultados em intervalos sub-horários, para cinco dias de uma semana de inverno e para cinco dias de uma semana de verão. Aquando a realização da simulação aumentou-se de dois para doze o número de intervalos de tempo por hora, com vista a aumentar a precisão dos resultados obtidos.

As figuras 39 e 40, ilustram, respetivamente, o comportamento das curvas associadas a parâmetros ambientais e de conforto, a ganhos internos, às cargas do sistema e ao fluxo de ar novo, para cinco dias, numa semana de verão e para cinco dias numa semana de inverno. Estes foram os *outputs* considerados relevantes para o objetivo deste estudo, uma vez que, permitem uma visualização geral e simultânea do funcionamento do sistema AVAC e da alteração dos *outputs* associados aos parâmetros de conforto, como a temperatura do ar interior. Permitem, também, perceber se as configurações do sistema AVAC estão a ser tidas em conta, mais concretamente, se a programação dos *setpoint* dos termostatos de aquecimento e arrefecimento estão a condicionar a temperatura do ar interior a ser 20°C e 25°C, respetivamente.

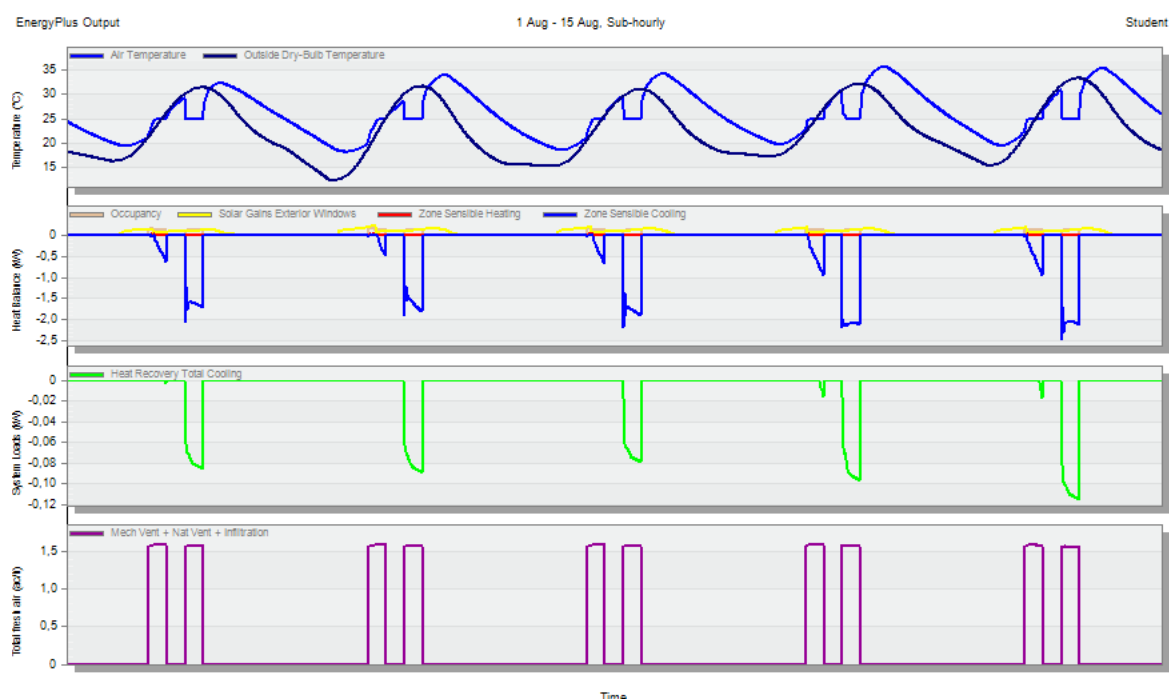


Figura 39- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de verão, para a localização de Lisboa, Portugal.

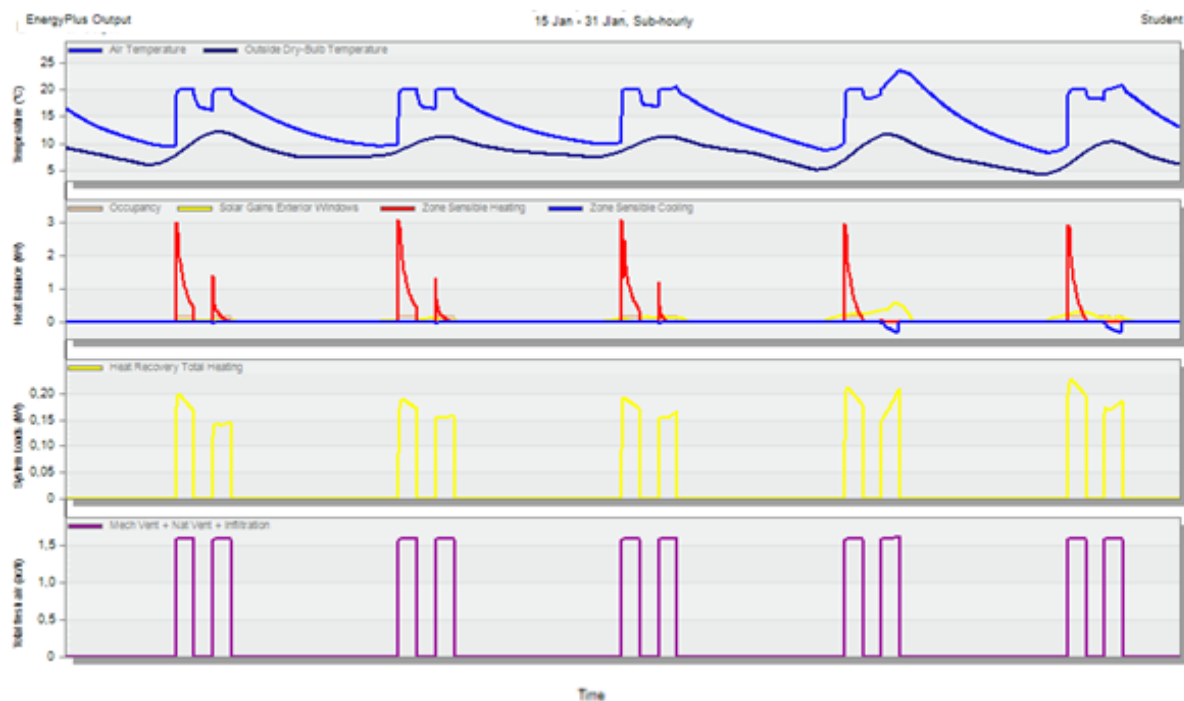


Figura 40- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de inverno, para a localização de Lisboa, Portugal.

De acordo com a figura 39, para os dias de verão, nota-se que a única necessidade do sistema é proceder ao arrefecimento da zona, durante o perfil de utilização definido, e que a recuperação de calor para arrefecimento funciona de acordo com essa necessidade de arrefecimento. A programação dos *setpoint* do termostato de arrefecimento também está a ter influência nos valores obtidos, uma vez que, a temperatura do ar interior, durante o horário do perfil de utilização, é de 25 °C. Por outro lado, no inverno, figura 40, para além da necessidade de aquecimento pode haver, também, a necessidade de arrefecimento. No entanto, ao analisar em simultâneo as necessidades de aquecimento e arrefecimento com as cargas do sistema, nota-se, que o sistema AVAC definido promove a recuperação de calor para aquecimento quando na realidade é necessário o arrefecimento da zona. Desta forma, pode-se concluir que é necessário proceder a um controlo do funcionamento do recuperador de calor. À semelhança da estação de verão, a programação dos *setpoint* do termostato de aquecimento também está a ter influência nos valores obtidos, uma vez que, a temperatura do ar interior, durante o horário do perfil de utilização, é de 20 °C. Para controlar o funcionamento do recuperador de calor, editaram-se os campos associados à unidade de tratamento de ar. Assim, esta opção, ao ser ativada, e tendo em conta a não utilização de nenhum economizador, a unidade de recuperação de calor aquece o ar externo até o ponto de ajuste de recuperação de calor e, não mais, enquanto a temperatura do ar externo estiver abaixo do ponto de ajuste. A unidade de recuperação de calor é ignorada quando o ponto de ajuste de temperatura é satisfeito. Quando a temperatura do ar externo ultrapassa a do ponto de ajuste de recuperação de calor, o permutador de calor já não é ignorado e funciona na sua plena capacidade, aquecendo o ar o máximo possível. Com esta adaptação, repetiram-se as simulações efetuadas para o conjunto de parâmetros LEO3E, para os mesmos cinco dias, cujas curvas obtidas estão presentes nas figuras 41 e 42, para o verão e para o inverno, respetivamente.

Com as alterações feitas, é possível observar, na figura 41, que para o verão, não se verificaram alterações, ou seja, há recuperação de calor com vista ao arrefecimento, quando há, simultaneamente, necessidade de arrefecer a zona. No entanto, as diferenças encontram-se na situação que retrata os cinco dias verão, figura 42. As novas curvas obtidas mostram que o controlo acionado para o recuperador de calor está a funcionar corretamente, ou seja, apenas se verifica que há recuperação de calor com vista ao aquecimento, quando realmente há necessidade de aquecer a zona.

Ao realizar esta análise paramétrica é, então possível, garantir que a definição dos campos do *software DesignBuilder*, permite obter resultados coerentes com a realidade e serve de base a todas as análises a serem realizadas mais à frente, ou seja, todas as simulações a serem realizadas terão por base as definições e considerações tomadas para este estudo.

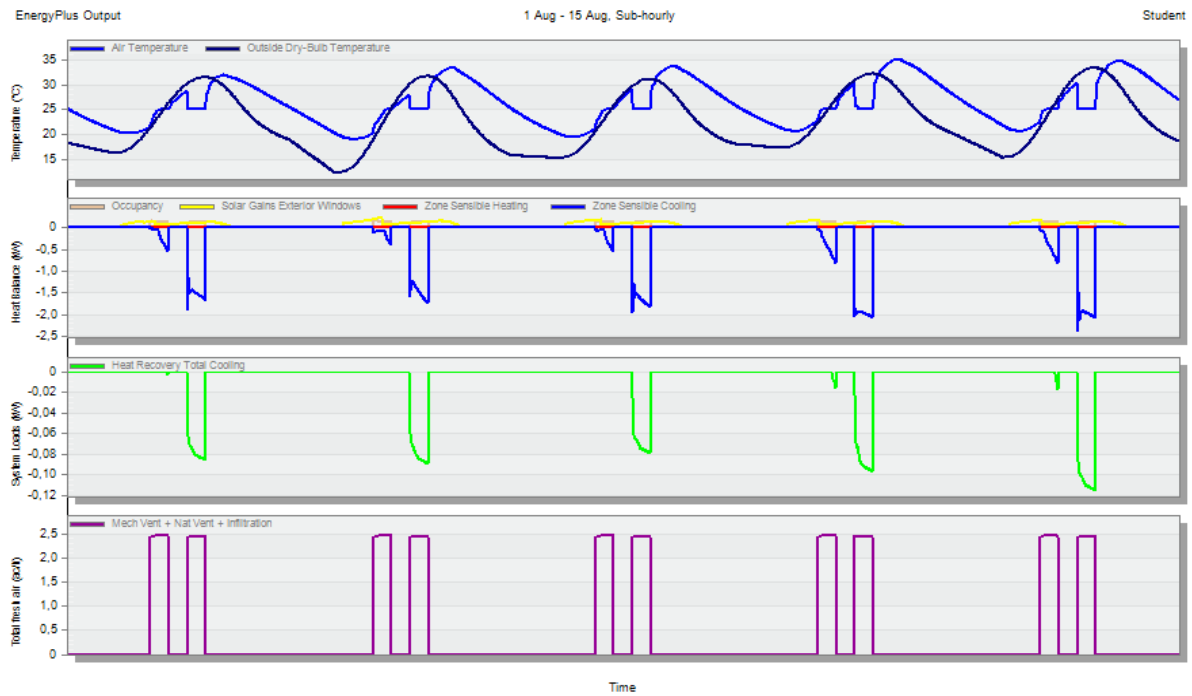


Figura 41- Nova performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de verão, para a localização de Lisboa, Portugal.

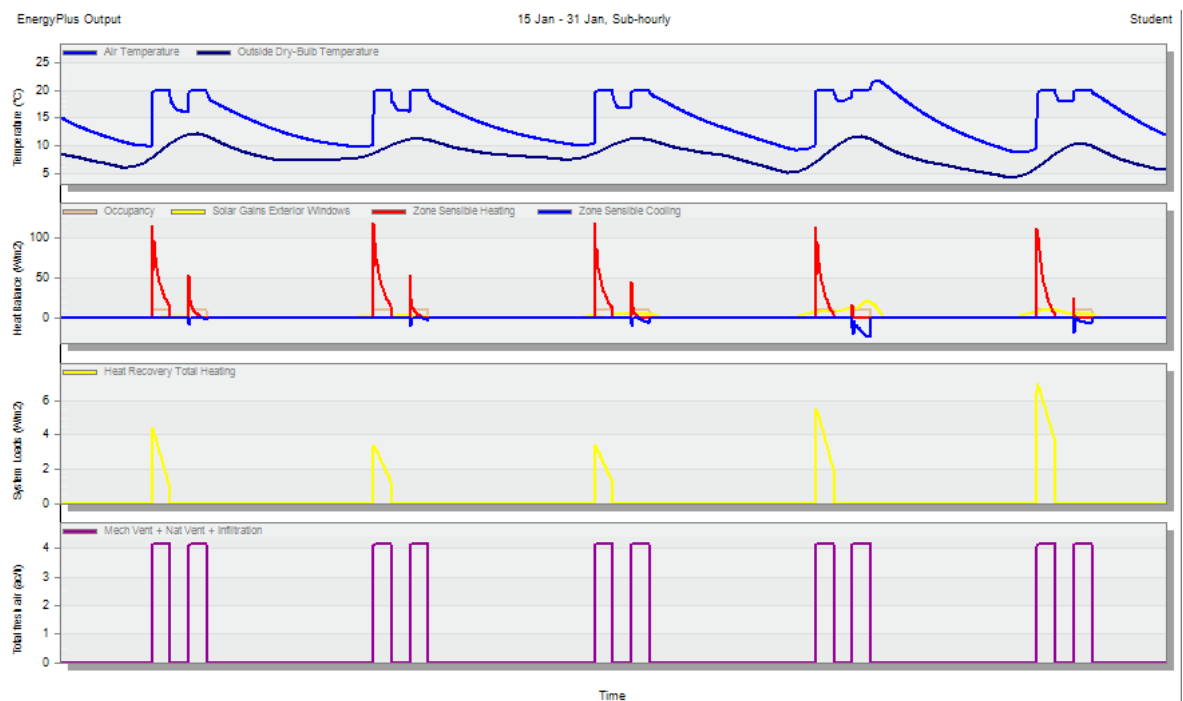


Figura 42- Nova performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de inverno, para a localização de Lisboa, Portugal.

2.6.2 Desempenho do Edifício em Helsínquia, Finlândia

Como já foi mencionado, a implantação da construção modular em Helsínquia, Finlândia, prevê a necessidade da definição de um novo sistema de AVAC, cujo funcionamento tenha em conta as características extremas associadas ao clima desta localização. Para além, do sistema AVAC, considerou-se, também, que seria necessário, no mínimo, a existência de elementos construtivos duplos (com o dobro do isolamento térmico). Estas duas considerações são já tidas em contas para a realização deste estudo paramétrico de análise da performance do edifício. Estas considerações, surgem, também, como a grande diferença no ponto de partida para a análise dos valores obtidos associados a cada uma das localizações.

Assim, à semelhança da análise paramétrica efetuada anteriormente, irá recorrer-se, neste caso, ao conjunto de parâmetros HEO3E que será sujeito a uma análise dos resultados em intervalos sub-horários, para cinco dias de uma semana de inverno e para cinco dias de uma semana de verão. Aquando a realização da simulação aumentou-se de dois para doze o número de intervalos de tempo por hora, com vista a aumentar a precisão dos resultados obtidos.

Assim, as figuras 43 e 44, representam, respetivamente, o comportamento das curvas associadas a parâmetros ambientais e de conforto, a ganhos internos, às cargas do sistema e ao fluxo de ar novo, para cinco dias, numa semana de verão e para cinco dias numa semana de inverno. Estes foram os *outputs* selecionados com vista à validação das configurações feitas no *software DesignBuilder*, para a localização de Helsínquia, bem como da definição do sistema AVAC.

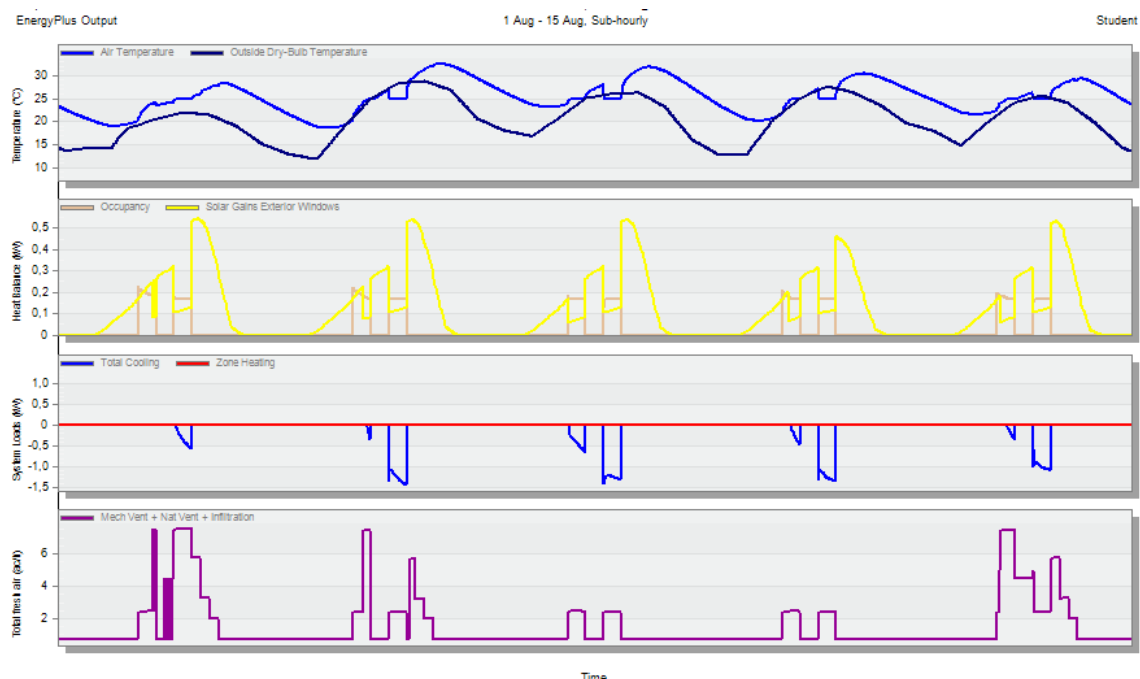


Figura 43- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de verão, para a localização de Helsínquia, Finlândia.

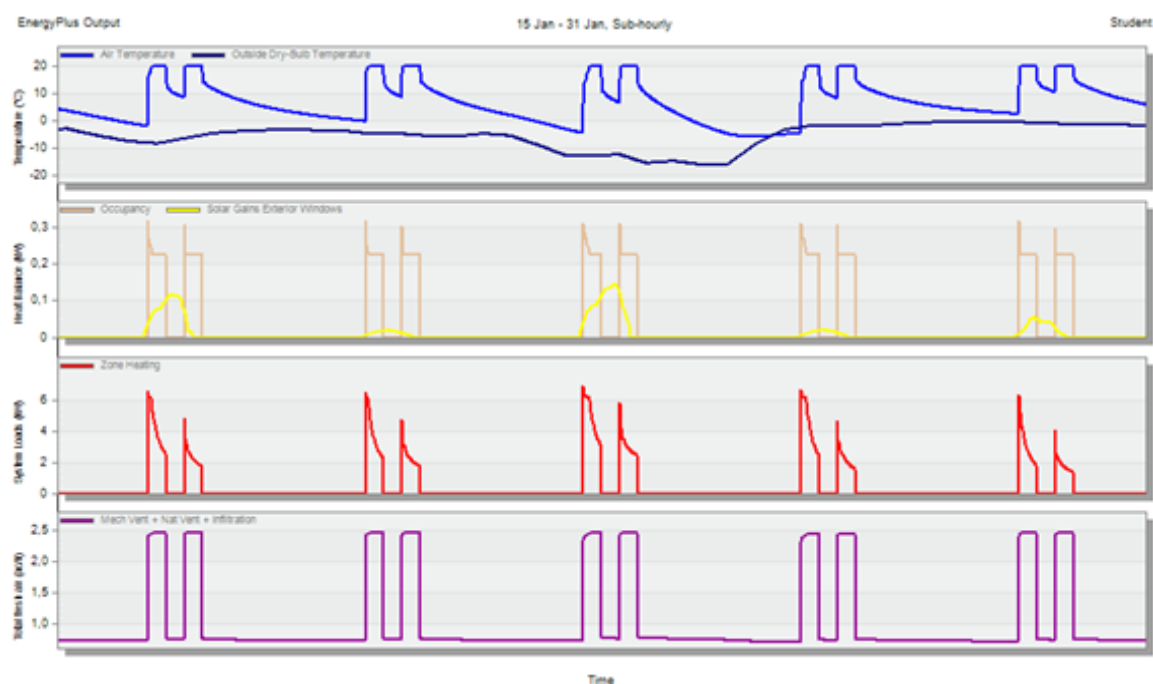


Figura 44- Performance da construção modular, em cinco dias de uma semana de inverno, para a localização de Helsínquia, Finlândia.

Ao analisar as figuras 43 e 44, é possível observar que quer para os cinco dias de verão, quer para os cinco dias de inverno, o sistema AVAC definido tem a capacidade de, durante o perfil de utilização definido para a construção modular, alcançar e manter a temperatura do ar interior nos valores definidos para os *setpoint* dos termostatos de aquecimento e de arrefecimento, ou seja, 20 °C, para inverno e 25 °C, para o verão, respetivamente.

As figuras 42 e 43 permitem, também, observar que para os dias de verão as necessidades de climatização são bastantes diferentes das necessidades de climatização nos dias de inverno, ou seja, verifica-se que, no inverno, apenas há a necessidade de aquecimento da zona ocupada durante o perfil de utilização definido. No entanto, no verão, verifica-se que há a necessidade de arrefecimento da zona ocupada, mas com necessidades de cargas térmicas mais baixas do que para o aquecimento. É ainda possível observar uma grande discrepância nos valores associados aos ganhos solares, sendo que são bastante superiores nos dias de verão, comparativamente aos dias de inverno. No entanto, estes valores já seriam espectáveis tendo em conta o número de horas de sol, em Helsínquia, no verão e no inverno.

Tendo em conta a análise feita e os gráficos das figuras 43 e 44, é possível determinar, que as considerações feitas para definir os campos no *software DesignBuilder* e o sistema AVAC considerado permitem uma performance do edifício aproximada à realidade, pelo que, os valores obtidos, podem ser utilizados de forma fidedigna e, assim,

estas considerações juntamente com o sistema AVAC podem ser aplicadas a todos os outros conjuntos de parâmetros relativos a Helsínquia.

2.7 Análise e Definição das Dimensões dos Vãos Envidraçados

O primeiro objetivo a cumprir com o recurso ao *software DesignBuilder* é o dimensionamento das janelas da construção modular. Assim, pretende-se realizar um estudo e analisar as tipologias 1.1 e 1.2, definidas anteriormente, que correspondem, respetivamente, à construção modular com janelas de 0,80x0,80 m e 1,20x0,8 m (úteis).

De forma a determinar qual a tipologia que melhor se adequa, irá definir-se um conjunto de parâmetros fixo durante toda a análise, à exceção da localização. Assim, irá sujeitar-se a construção modular com 5 janelas à orientação Norte/Sul, com um tipo de atividade sedentária, escritório, em primeiro, num clima associado à localização de Lisboa, Portugal e, de seguida, num clima associado à localização de Helsínquia, Finlândia. Desta forma, de acordo com a nomenclatura criada anteriormente, as simulações serão realizadas para LNS5E e HNS5E, respetivamente. Os resultados utilizados para caracterizar o consumo energético, com o objetivo de definir as dimensões das janelas, são obtidos com base numa análise anual dos *outputs* associados ao consumo de combustível e às cargas do sistema.

2.7.1 Análise do Consumo Energético

Para esta análise, a observação e comparação de valores será feita recorrendo ao consumo de combustível utilizado unicamente na climatização que, neste caso, diz respeito ao consumo de eletricidade. No entanto, apenas serão analisados os consumos associados ao aquecimento e arrefecimento da zona, para o perfil de utilização definido, excluindo, assim, os consumos associados à iluminação e utilização de outros equipamentos. Os valores obtidos para o consumo energético surgem dependentes da climatização da zona, necessária para assegurar o conforto térmico no interior da construção modular.

2.7.1.1 Clima Lisboa, Portugal

No sentido de analisar e comparar os valores relativos à localização de Lisboa, Portugal, a Tabela 10 ilustra os valores obtidos para a tipologia 1.1, para uma análise anual e a tabela 11 apresenta, por sua vez, os valores obtidos referentes à tipologia 1.2, também, para uma análise anual do consumo energético.

Tabela 10-Consumo Energético anual, tipologia 1.1, para Lisboa.

	Consumo Energético Anual – Tipologia 1.1			
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]
LNS5E	15,85	-36,42	5,23	15,95

Tabela 11- Consumo Energético anual, tipologia 1.2, para Lisboa.

	Consumo Energético Anual – Tipologia 1.2			
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]
LNS5E	14,70	-42,20	4,76	17,83

Para uma comparação mais intuitiva dos valores presentes nas tabelas 10 e 11, os valores associados ao consumo de eletricidade serão apresentados sob a forma gráfica, na Figuras 45.

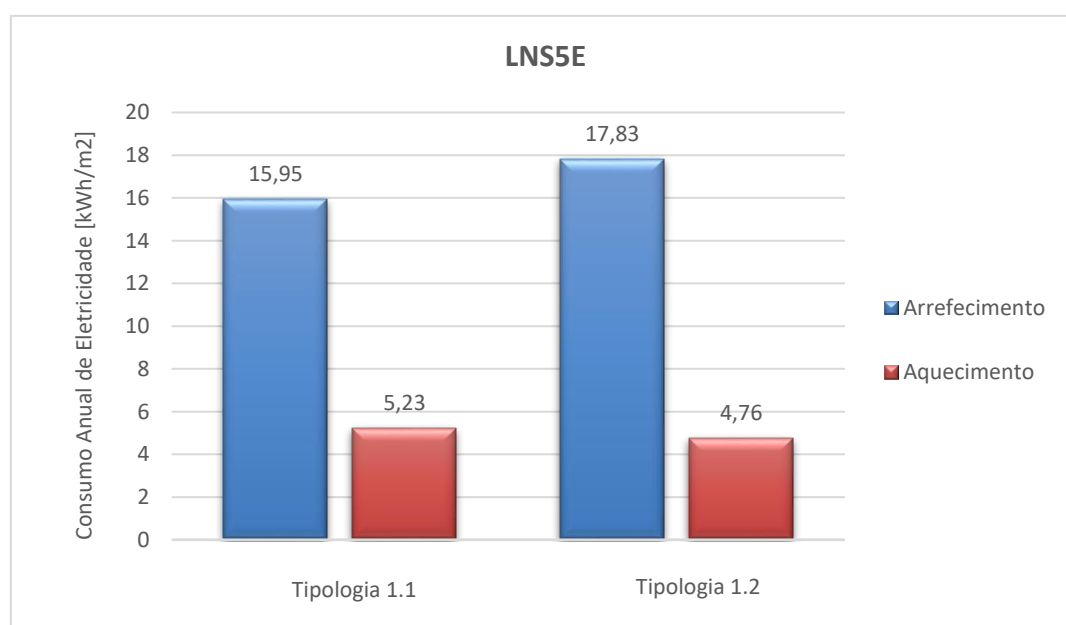


Figura 45 – Comparação dos valores associados ao consume anual de eletricidade, entre a tipologia 1.1 e 1.2, para efeitos de climatização na localização de Lisboa.

Com a análise do gráfico da figura 45, é possível observar as diferenças entre o consumo energético anual, para cada uma das tipologias. Neste sentido, observa-se que a tipologia 1.1 diminui a necessidade de consumo energético para o arrefecimento e aumenta a necessidade de consumo energético para o aquecimento, quando comparada com a tipologia 1.2. Em termos percentuais, a tipologia 1.1 promove uma redução anual do consumo de eletricidade, com vista ao arrefecimento, em cerca de 10,5%. Por sua vez, a tipologia 1.2 implica uma redução no consumo anual de eletricidade para efeitos de aquecimento de 8,98%.

Desta forma, para Lisboa, apesar de se verificar vantagens associadas a qualquer uma das tipologias, verifica-se uma maior redução no consumo de eletricidade anual quando se opta pela tipologia 1.1

2.7.1.2 Clima Helsínquia, Finlândia

À semelhança do procedimento realizado para analisar a influência da alteração da percentagem de envidraçado nas variações no consumo energético do clima associado à localização de Lisboa, a mesma metodologia será seguida para a mesma análise, mas neste caso, relativamente ao clima da localização Helsínquia, Finlândia. Desta forma, no sentido de analisar e comparar os valores relativos a esta localização, a tabela 12 os valores obtidos para a tipologia 1.1, para uma análise anual, e a tabela 13 apresenta, por sua vez, os valores obtidos referentes à tipologia 1.2, também, para uma análise anual do consumo energético associado à construção modular.

Tabela 12- Consumo Energético anual, tipologia 1.1, para Helsínquia.

	Consumo Energético Anual – Tipologia 1.1			
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]
HNS5E	94,42	-4,52	24,33	1,30

Tabela 13- Consumo Energético anual, tipologia 1.2, para Helsínquia.

	Consumo Energético Anual – Tipologia 1.2			
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]
HNS5E	95,17	-6,09	24,98	1,75

Serão, então, apresentados os valores presentes nas tabelas 12 e 13 sob a forma gráfica, de forma a tornar a sua análise mais fácil e intuitiva. Desta forma, a Figura 46,

traduz sob a forma gráfica os valores associados ao consumo anual de eletricidade, para cada uma das tipologias.

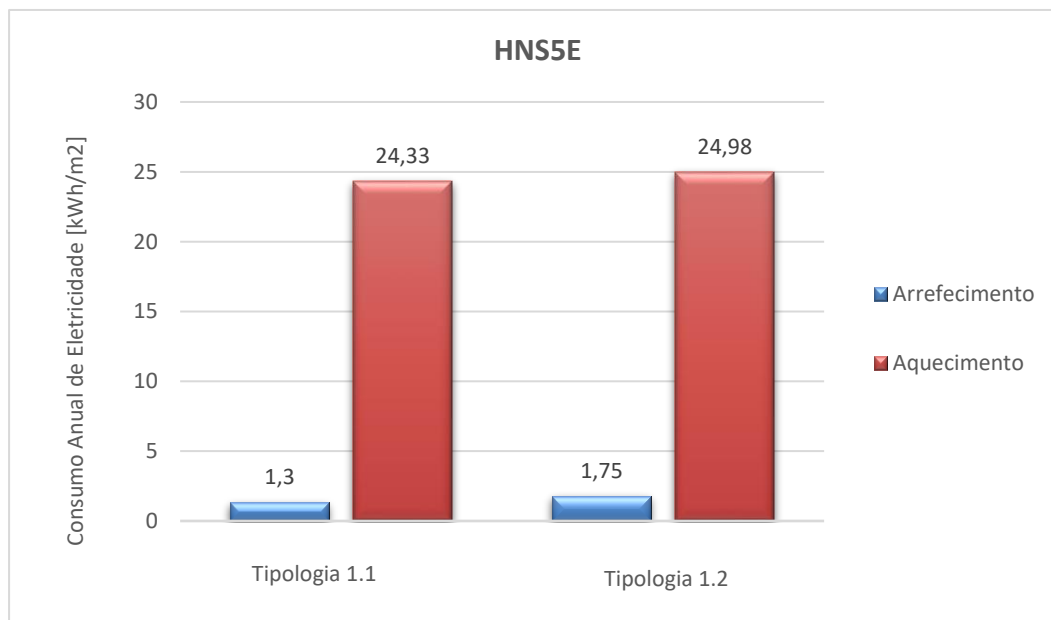


Figura 46- Comparação dos valores associados ao consumo anual de eletricidade, entre a tipologia 1.1 e 1.2, para efeitos de climatização na localização de Helsínquia.

Para a localização de Helsínquia, Finlândia, na estação de aquecimento, como seria de esperar, o consumo de combustível associado ao arrefecimento é muito reduzido, mas mesmo assim, é a tipologia que verifica uma redução da necessidade de consumo anual de eletricidade, com vista ao arrefecimento, em cerca de 25,7%, quando comparada com a tipologia 1.2. No entanto, apesar de, para o aquecimento, os valores anuais do consumo de eletricidade não variarem significativamente é, também, a tipologia 1.1 que apresenta os valores mais vantajosos no que diz respeito ao consumo energético anual da construção modular. Assim, verifica-se uma redução do consumo anual de eletricidade em 2,6%, para efeitos de aquecimento, comparativamente com a tipologia 1.2.

Neste sentido, à semelhança da localização de Lisboa, Portugal, é a tipologia 1.1 que apresenta resultados mais vantajosos quando o local de implantação da construção modular é Helsínquia, Finlândia.

2.7.2 Definição das Dimensões dos Vãos Envidraçados

Para definir as dimensões mais apropriadas das janelas, para além do estudo efetuado anteriormente, é necessário ter em conta que este trabalho assenta na base do

desenvolvimento de um produto modular, ou seja, todas as dimensões são padronizadas segundo uma unidade modular de 500 mm, surgindo, assim, as tipologias 1.1 e 1.2

Com o estudo realizado, verificou-se que, para qualquer uma das localizações, a tipologia 1.1 é a que confere mais vantagens ao nível do consumo energético anual. Os resultados obtidos permitem, então, definir as dimensões das janelas como sendo de 0,80x0,80 m (úteis), de acordo com a tipologia 1.1. A figura 47 ilustra a disposição e dimensões das janelas na volumetria definida da construção modular.

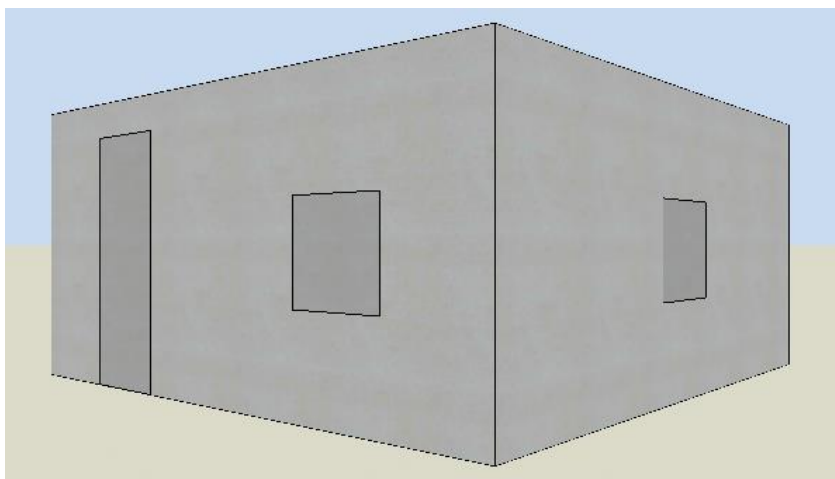


Figura 47 – Definição das dimensões e disposição aberturas.

2.8 Estimativa e Caracterização do Consumo Energético

Após a determinação das dimensões das janelas, a análise do consumo energético anual da construção modular pretende evidenciar, qual ou quais, os conjuntos de parâmetros que potenciam um consumo energético mais baixo. Para isso, será seguida a metodologia referida na secção 2.4 e a nomenclatura criada.

Os valores apresentados nas tabelas 14 e 15, correspondem, respetivamente, aos valores numéricos obtidos relativamente à localização de Lisboa, Portugal e Helsínquia, Finlândia. Os resultados apresentados nestas tabelas, correspondem aos valores anuais obtidos para as cargas do sistema e para o consumo de combustível, neste caso, eletricidade.

Procedeu-se, também, ao cálculo dos COP anuais médios de aquecimento e arrefecimento, uma vez que, para cada uma das localizações, foi considerado um sistema AVAC diferente, e desta forma é possível observar e analisar como varia a performance destes mesmos sistemas, anualmente, para cada um dos conjuntos de parâmetros. O cálculo dos COP está, também, associado ao facto de o objetivo do presente trabalho ser comparar a variação dos valores associados ao consumo energético anual com a alteração

dos parâmetros definidos anteriormente, e não com a alteração do sistema AVAC, que surge como uma necessidade tendo em conta as características climáticas de ambos os locais.

Tabela 14- Consumo energético anual, para os conjuntos de parâmetros associados à localização de Lisboa.

	Consumo Energético Anual					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]	COP anual médio aquecimento	COP anual médio arrefecimento
LNS3E	15,26	-34,56	5,12	15,47	3,0	2,2
LNS3G	3,55	-87,00	1,37	30,16	2,6	2,9
LNS5E	15,85	-36,42	5,23	15,95	3,0	2,3
LNS5G	3,86	-89,04	1,45	30,68	2,7	2,9
LEO3E	22,76	-26,77	7,16	12,47	3,2	2,1
LEO3G	5,57	-72,99	2,02	26,72	2,8	2,7
LEO5E	18,33	-34,29	6,18	14,82	3,0	2,3
LEO5G	4,34	-84,58	1,69	29,47	2,6	2,9

Tabela 15- Consumo energético anual, para os conjuntos de parâmetros associados à localização de Helsínquia.

	Consumo Energético Anual					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]	COP anual médio aquecimento	COP anual médio arrefecimento
HNS3E	91,71	-4,07	23,56	1,17	3,9	3,5
HNS3G	52,86	-19,84	14,74	5,71	3,6	3,5
HNS5E	94,42	-4,52	24,33	1,30	3,9	3,5
HNS5G	55,71	-20,88	15,53	6,00	3,6	3,5
HEO3E	101,24	-2,06	25,31	0,60	4,0	3,4
HEO3G	56,54	-15,31	15,63	4,41	3,6	3,5
HEO5E	97,81	-3,39	24,79	0,98	3,9	3,5
HEO5G	57,81	-18,29	16,04	5,26	3,6	3,5

2.8.1 Análise dos Resultados Anuais de Consumo Energético

O estudo feito ao nível do consumo energético anual da construção modular, cujos resultados foram apresentados nas tabelas 14 e 15, tem como base a variação dos quatro parâmetros (localização, orientação, número de janelas e atividade metabólica) em simultâneo co acionamento do sombreamento interior dos vãos. Neste sentido, a análise dos valores anuais obtidos será feita de quatro formas diferentes, de forma a analisar individualmente o contributo de cada parâmetro para promover o aumento ou diminuição do consumo de eletricidade associado à climatização da zona ocupada da construção modular. Os valores apresentados sob a forma gráfica, dizem respeito ao consumo anual de eletricidade utilizada apenas para efeitos de climatização.

Localização

Os locais definidos para a implantação foram Lisboa, Portugal e Helsínquia, Finlândia. Tendo em conta os resultados presentes nas tabelas 14 e 15, as figuras 48 a 51 representam sob a forma gráfica os valores associados aos conjuntos de simulações LNS3E/HNS3E, LNS5G/HNS5G, LEO3G/HEO3G e LEO5E/HEO5E. Tal como já foi explicado, a escolha destes conjuntos de parâmetros visa analisar a variação do parâmetro relativo à localização, enquanto os restantes se mantém fixos. Desta forma, a representação gráfica dos valores pretende que a sua comparação seja mais rápida e intuitiva e, assim, perceber qual a influência que a localização de implantação da construção modular tem nos valores associados ao consumo energético anual.

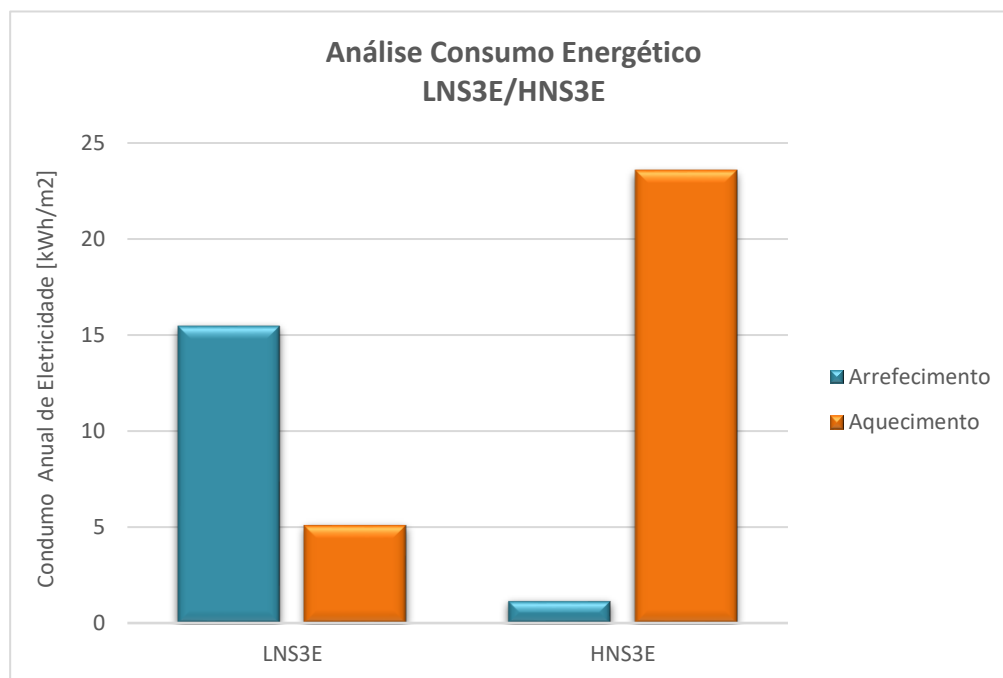


Figura 48- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LNS3E e HNS3E.

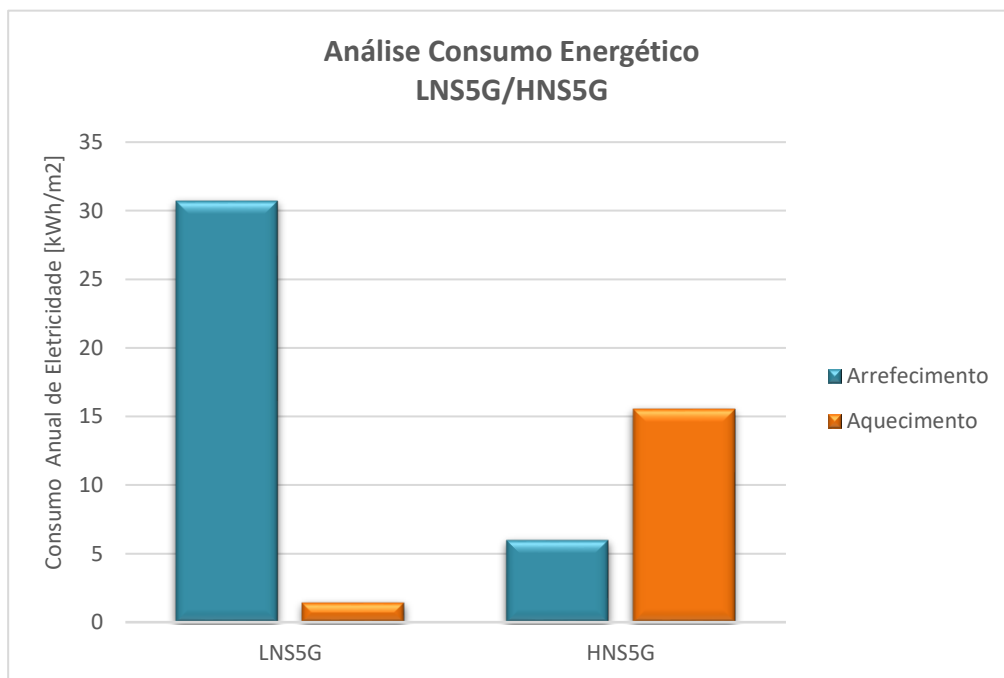


Figura 49- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LNS5G e HNS5G.

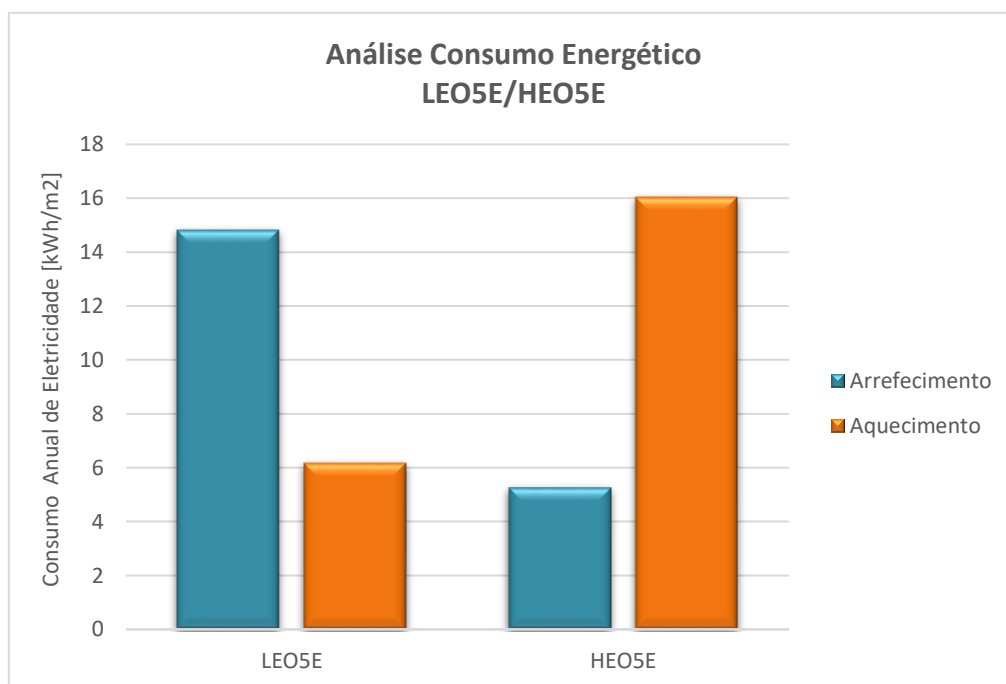


Figura 50- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LEO5E e HEO5E.

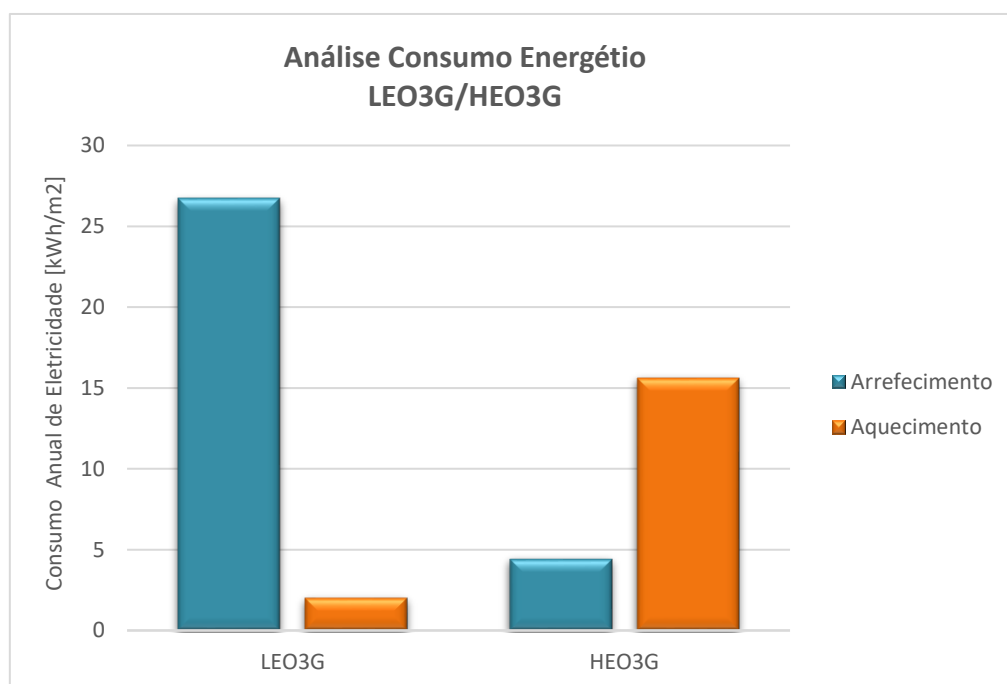


Figura 51- Comparação da influência de alteração da localização nos conjuntos de parâmetros LEO3G e HEO3G.

Ao observar os gráficos as figuras 48 a 51 é possível determinar que o parâmetro da localização tem influência significativa no consumo energético da construção modular, quer para o consumo de eletricidade associado ao arrefecimento, quer para o consumo de eletricidade associado ao aquecimento. Em todas as figuras anteriores, é possível observar o padrão anual dos consumos de eletricidade para cada uma das localizações, e, desta forma, é possível determinar, que a localização de Lisboa pode ter a necessidade de consumir anualmente cerca de mais 80,4% para o arrefecimento do que a localização de Helsínquia, como ilustra o conjunto de parâmetros LNS5G/HNS5G. Por sua vez, em termos do consumo anual de eletricidade com vista ao aquecimento, é a localização associada a Helsínquia que prevê os maiores consumos, com consumos que podem ser 78,3% superiores, quando comparados com a localização de Lisboa.

Assim, considera-se a localização da implantação da construção modular como um parâmetro com grande relevância no que diz respeito à sua influência ao nível dos consumos energéticos.

Orientação

Foram definidas como orientações possível da construção modular as orientações Norte/Sul e Este/Oeste. Para esta análise selecionaram-se os conjuntos de simulações LNS3E/LEO3E, LNS5G/LEO5G, HNS3G/HEO3G e HNS5E/HEO5E, onde serão considerados os valores anuais obtidos para o consumo de eletricidade. Desta forma, a tabela 16 ilustra

os valores já apresentados anteriormente nas tabelas 14 e 15, mas apenas considerando as simulações selecionadas, com vista a uma comparação mais intuitiva dos valores em questão para esta análise. Na perspetiva de analisar e comparar os valores presentes na tabela 16 de uma forma mais rápida, estes serão apresentados sob a forma gráfica nas figuras 52 a 55.

Tabela 16- Consumo energético anual, em função da variação da orientação, para os conjuntos de parâmetros.

	Consumo Energético Anual					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]	COP anual médio aquecimento	COP anual médio arrefecimento
LNS3E	15,26	-34,56	5,12	15,47	3,0	2,2
LEO3E	22,76	-26,77	7,16	12,47	3,2	2,1
LNS5G	3,86	-89,04	1,45	30,68	2,7	2,9
LEO5G	4,34	-84,58	1,69	29,47	2,6	2,9
HNS3G	52,86	-19,84	14,74	5,71	3,6	3,5
HEO3G	56,54	-15,31	15,63	4,41	3,6	3,5
HNS5E	94,42	-4,52	24,33	1,30	3,9	3,5
HEO5E	97,81	-3,39	24,79	0,98	3,9	3,5

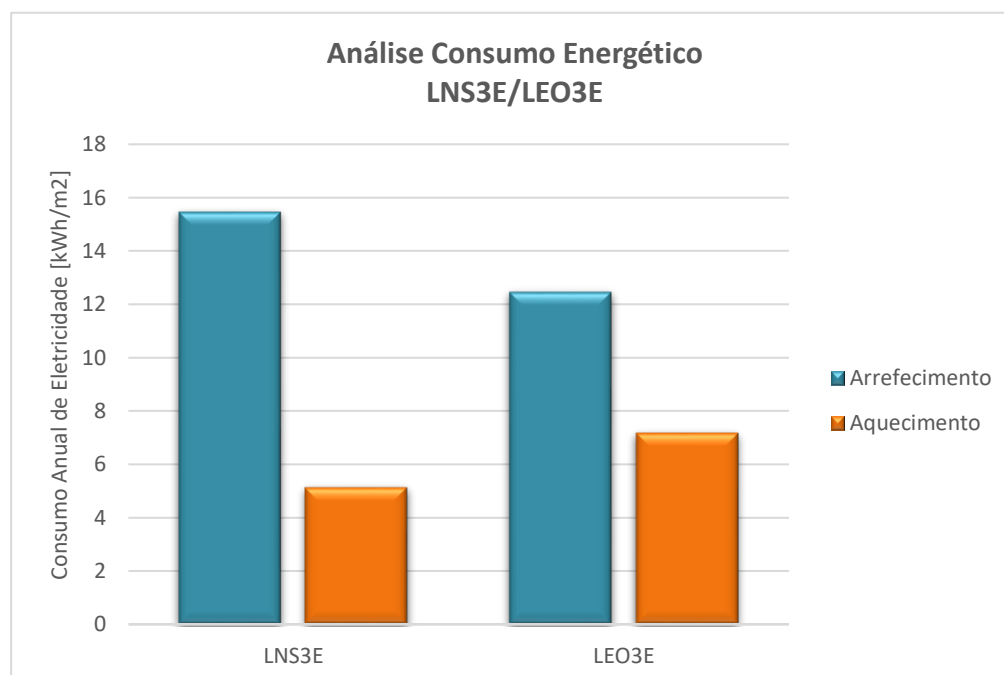


Figura 52- Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros LNS3E e LEOS3E.

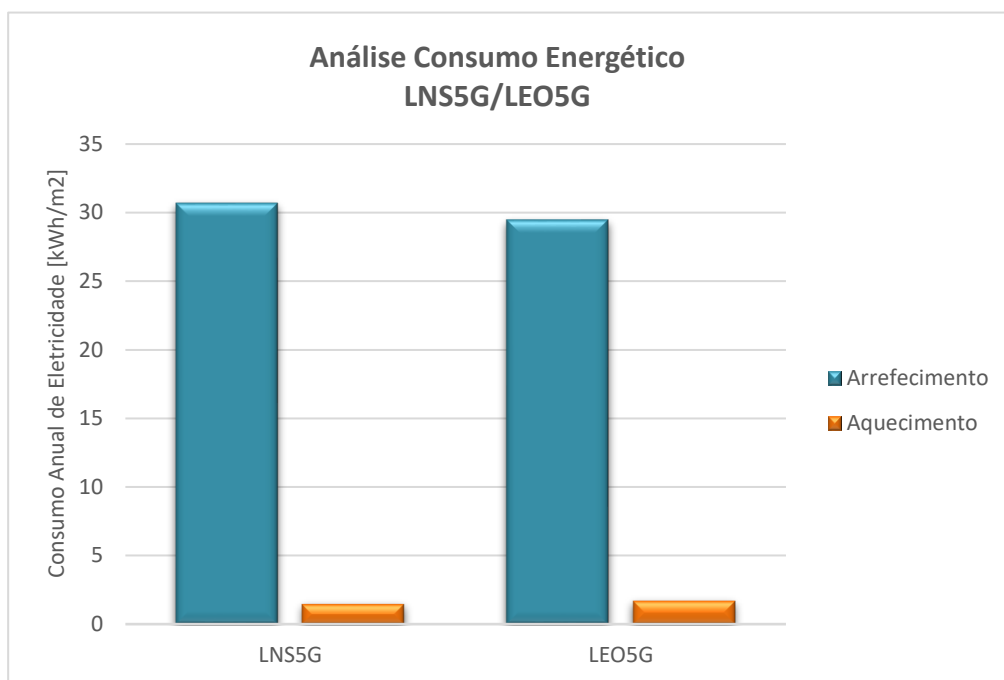


Figura 53 - Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros LNS5G e LEO5G.

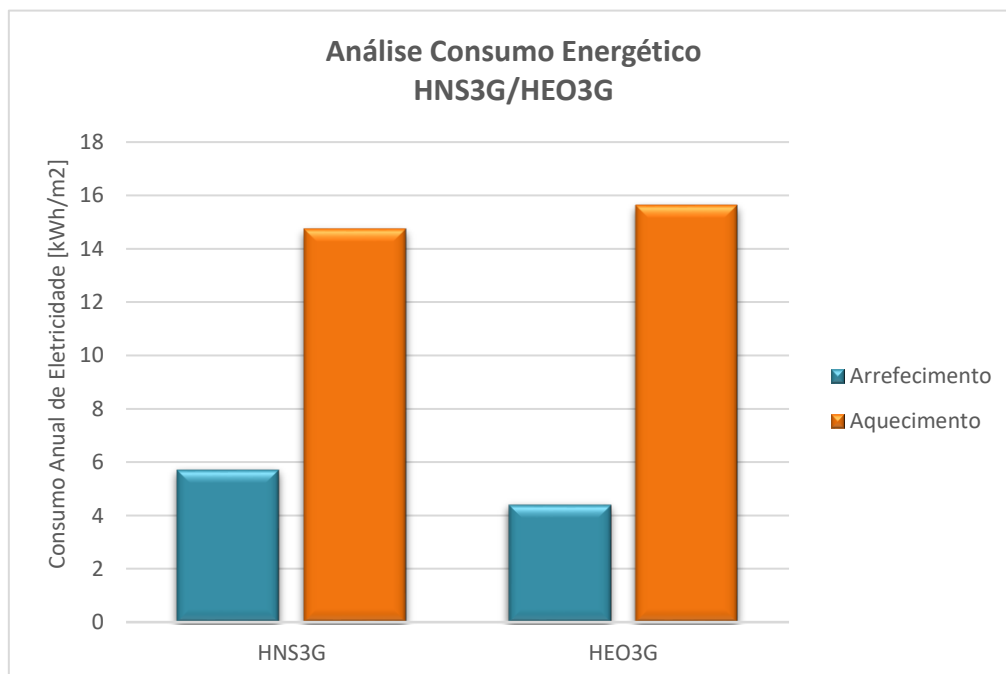


Figura 54- Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros HNS3G e HEO3.

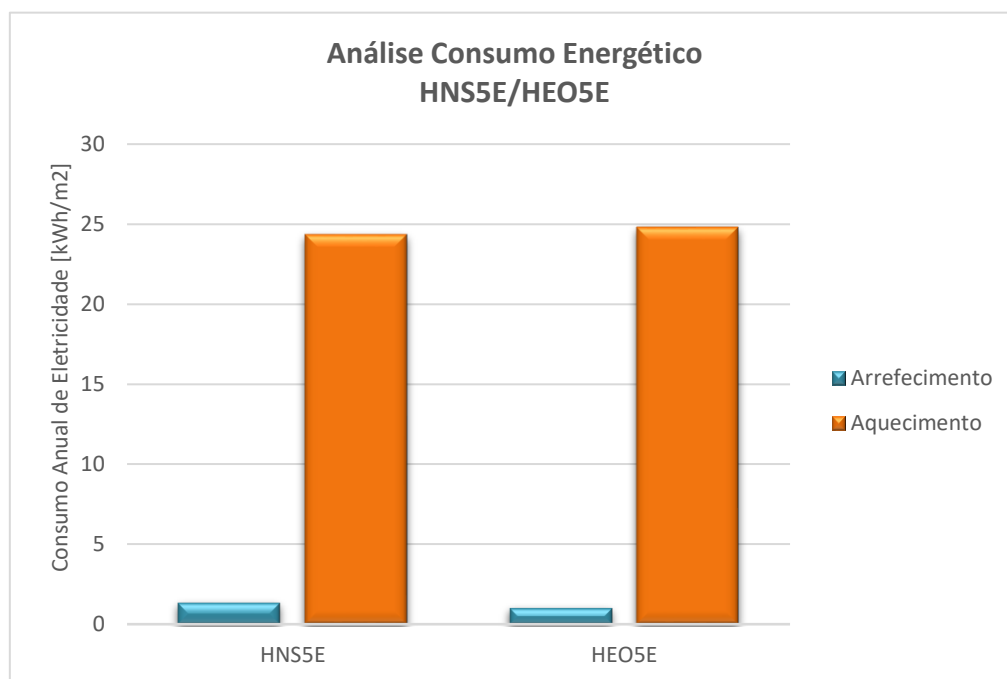


Figura 55- Comparação da influência de alteração da orientação nos conjuntos de parâmetros HNS3E e HEO3E.

Com a análise dos gráficos presentes nas figuras 52 a 55, é possível observar que a orientação dada à construção modular tem alguma influência em termos de consumo energético. Em todas as situações anteriores, a orientação Norte/Sul, promove a maximização dos ganhos solares, no entanto, tendo em conta, por exemplo a quase inexistente inércia térmica da construção modular, esta orientação implica também maiores consumos anuais de eletricidade com vista ao arrefecimento. Para o aquecimento, em todas as situações anteriores, observa-se que é a orientação Este/Oeste que promove maiores consumos anuais de eletricidade.

Assim, não é possível definir um padrão da influência da orientação nos consumos energéticos, havendo vantagens e desvantagens para ambas as orientações escolhidas. Pode, então, concluir-se que a orientação dada à implantação da construção pode ser a que mais convém ao utilizador.

Número de Janelas

Com a definição das dimensões das aberturas, o número de janelas da construção modular é variável, sendo que, podem ser adotadas três ou cinco. À semelhança das análises já efetuadas, nesta situação irá fazer-se variar o número de janelas e os restantes parâmetros serão mantidos fixos. Neste sentido, selecionam-se os conjuntos de simulações LNS3E/LNS5E, LEO3G/LEO5G, HNS3G/HNS5G e HEO3E/HEO5E, com vista a

determinar a influência que a alteração do número de janelas, percentagem de envidraçado, tem no consumo energético associado à climatização da construção modular. Para analisar mais facilmente os valores obtidos, na tabela 17 estão presentes os valores relativos às simulações selecionadas, já presentes anteriormente nas tabelas 14 e 15.

Tabela 17- Consumo energético anual, em função da variação do número de janelas, para os conjuntos de parâmetros.

	Consumo Energético Anual					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]	COP anual médio aquecimento	COP anual médio arrefecimento
LNS3E	15,26	-34,56	5,12	15,47	3,0	2,2
LNS5E	15,85	-36,42	5,23	15,95	3,0	2,3
LEO3G	5,57	-72,99	2,02	26,72	2,8	2,7
LEO5G	4,34	-84,58	1,69	29,47	2,6	2,9
HNS3G	52,86	-19,84	14,74	5,71	3,6	3,5
HNS5G	55,71	-20,88	15,53	6,00	3,6	3,5
HEO3E	101,24	-2,06	25,31	0,60	4,0	3,4
HEO5E	97,81	-3,39	24,79	0,98	3,9	3,5

Com vista a analisar de forma mais rápida os valores presentes na tabela 17, as Figuras 55 a 58, ilustram sob a forma gráfica estes mesmo valores que dizem respeito aos conjuntos de simulações considerados. Desta forma, será mais intuitivo perceber se a variação da percentagem de envidraçado influencia os consumos anuais de eletricidade para a climatização da construção modular, quer para efeitos de aquecimento, quer para efeitos de arrefecimento.

Ao analisar os gráficos das figuras 56 a 59 é possível observar que, em termos do consumo de eletricidade anual com vista ao aquecimento, a variação do número de janelas, percentagem de envidraçado não tem padrão, isto é, há vantagens e desvantagens associadas a cada uma das situações. No entanto, para todas as situações anteriores, a existência de cinco janelas na construção modular implica maiores consumos de eletricidade anuais com vista ao arrefecimento, quando comparado com a situação em que apenas existem três janelas. Por exemplo, no caso da análise do conjunto de parâmetros LEO3G/LEO5G, a existência de cinco janelas pode levar, para o arrefecimento, a um consumo anual de eletricidade 9,6% superior, quando comparado com a existência de três janelas.

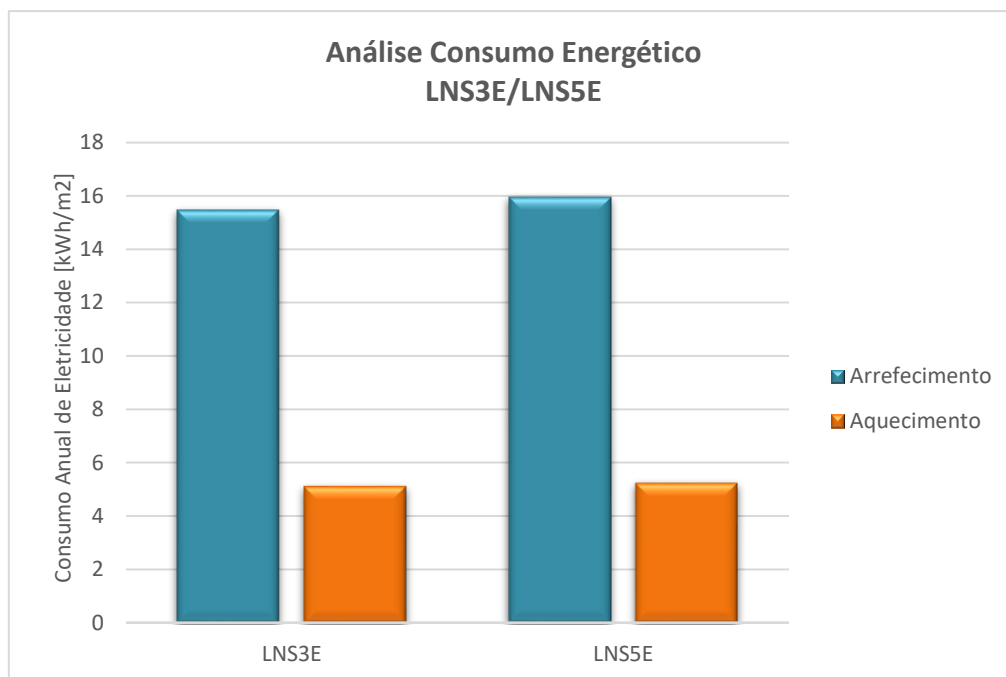


Figura 56- Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros LNS3E e LNS5E.

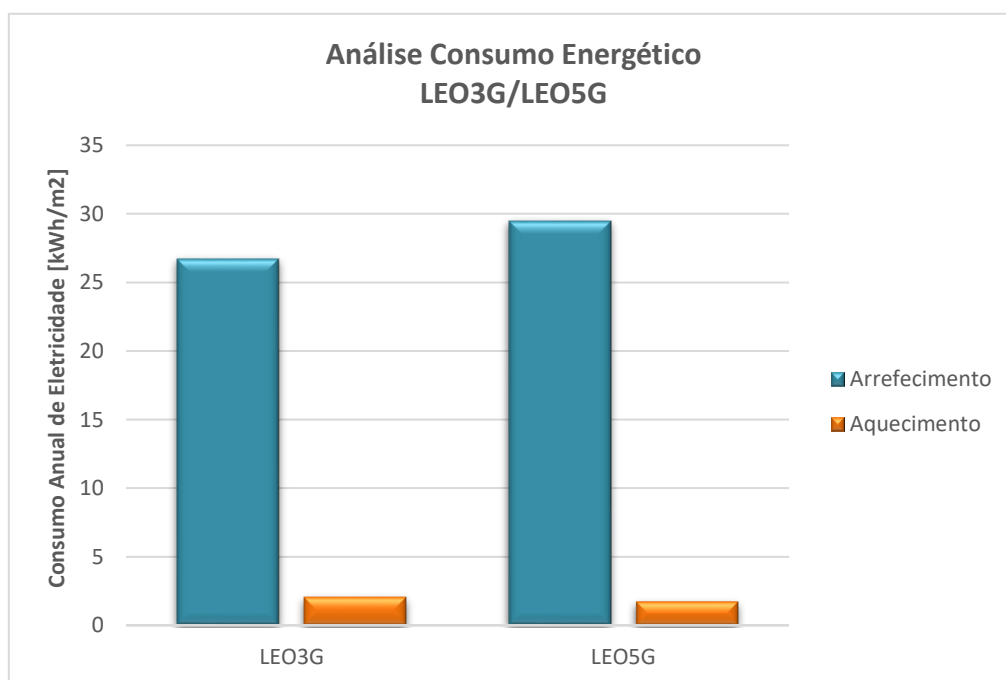


Figura 57 - Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros LEO3G e LEO5G.

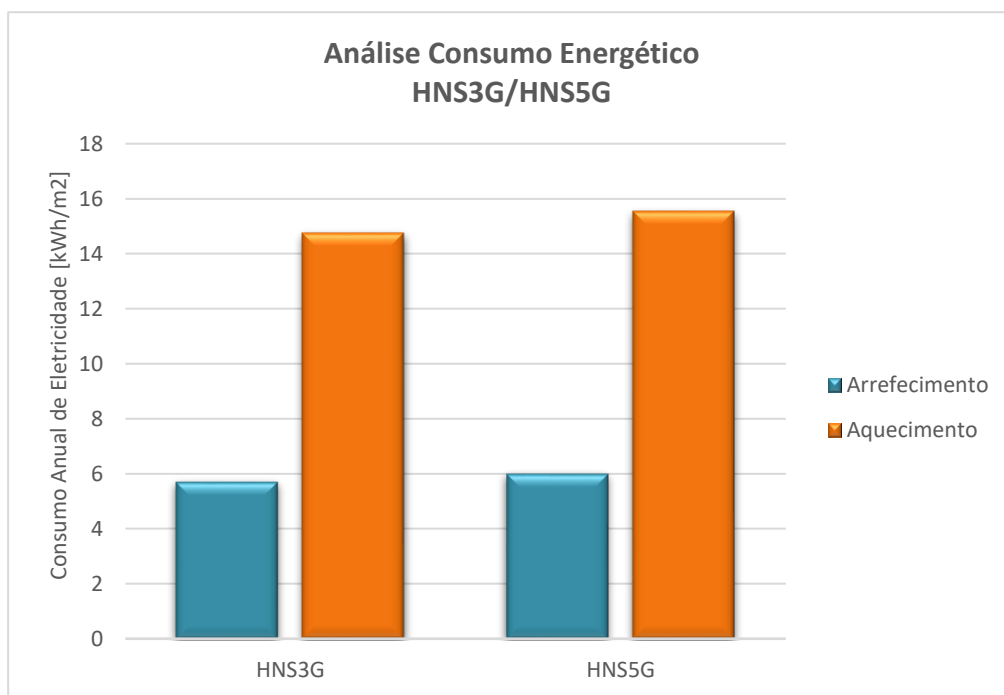


Figura 58- Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros HNS3G e HNS5G.

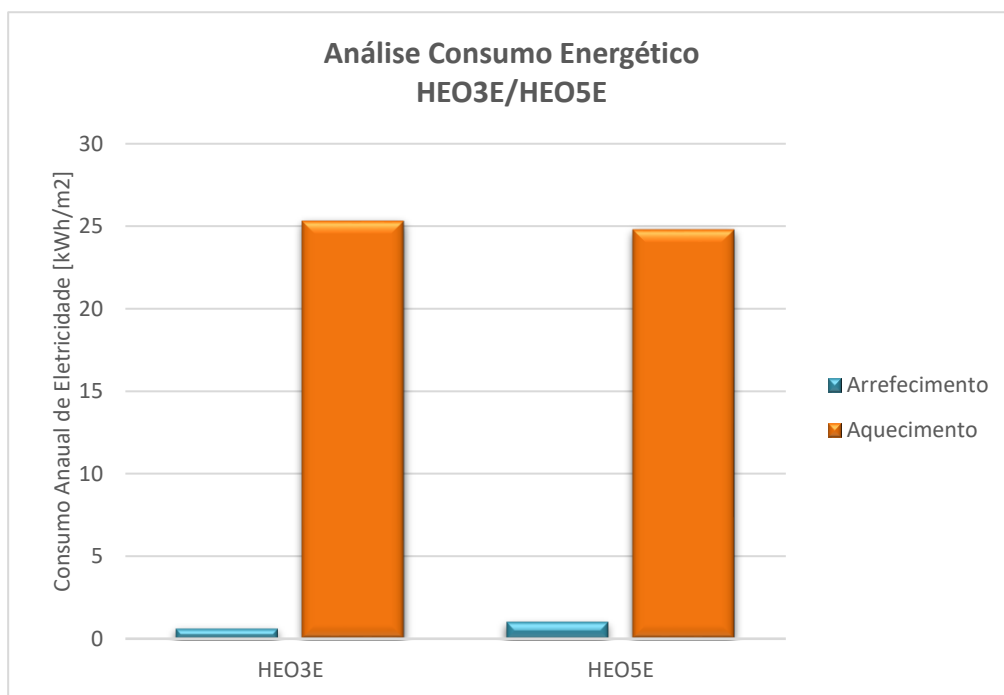


Figura 59- Comparação da influência de alteração do número de janelas nos conjuntos de parâmetros HEO3E e HEO5E.

Assim, é possível determinar que o número de janelas tem influência no consumo energético da construção modular, sendo mais evidente nos consumos anuais de eletricidade associados ao arrefecimento, sendo que, a solução construtiva que melhor resultados apresenta é aquela que prevê a existência de apenas três janelas. A justificação para tal, poderá estar relacionada com o facto de a inércia térmica da construção modular ser praticamente nula e os ganhos solares através dos elementos envidraçados levam a que haja necessidade de arrefecimento para manter o conforto térmico no interior da construção modular.

Atividade

A construção modular pretende desempenhar a função de anexo, logo cabe ao utilizador da mesma decidir o fim concreto a que se destina. O tipo de atividade metabólica a desenvolver, no interior da construção modular, corresponde ao último parâmetro a ser analisado, de modo a perceber qual a sua relação com a variação dos valores associados ao consumo de eletricidade para a climatização da zona.

Os conjuntos de simulações LNS3E/LNS3G, LEO5E/LEO5G, HNS5E/HNS5G e HEO3E/HEO3G foram os considerados para a analisar a influência do tipo de atividade metabólica ao nível do consumo energético anual da construção modular. Desta forma, na tabela 18 estão presente os valores anuais obtidos do consumo de eletricidade. De notar que estes valores já foram apresentados nas tabelas 14 e 15.

À semelhança das análises de todos os outros parâmetros, na perspetiva de analisar e comparar os valores presentes na tabela anterior de uma forma mais intuitiva, estes serão apresentados sob a forma gráfica nas figuras 60 a 63.

Tabela 18- Consumo energético anual, em função da variação do tipo de atividade metabólica, para os conjuntos de parâmetros.

	Consumo Energético Anual					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CAEAQ [kWh/m ²]	CAEAR [kWh/m ²]	COP anual médio aquecimento	COP anual médio arrefecimento
LNS3E	15,26	-34,56	5,12	15,47	3,0	2,2
LNS3G	3,55	-87,00	1,37	30,16	2,6	2,9
LEO3E	22,76	-26,77	7,16	12,47	3,2	2,1
LEO3G	5,57	-72,99	2,02	26,72	2,8	2,7
HNS5E	94,42	-4,52	24,33	1,30	3,9	3,5
HNS5G	55,71	-20,88	15,53	6,00	3,6	3,5
HEO3E	101,24	-2,06	25,31	0,60	4,0	3,4
HEO3G	56,54	-15,31	15,63	4,41	3,6	3,5

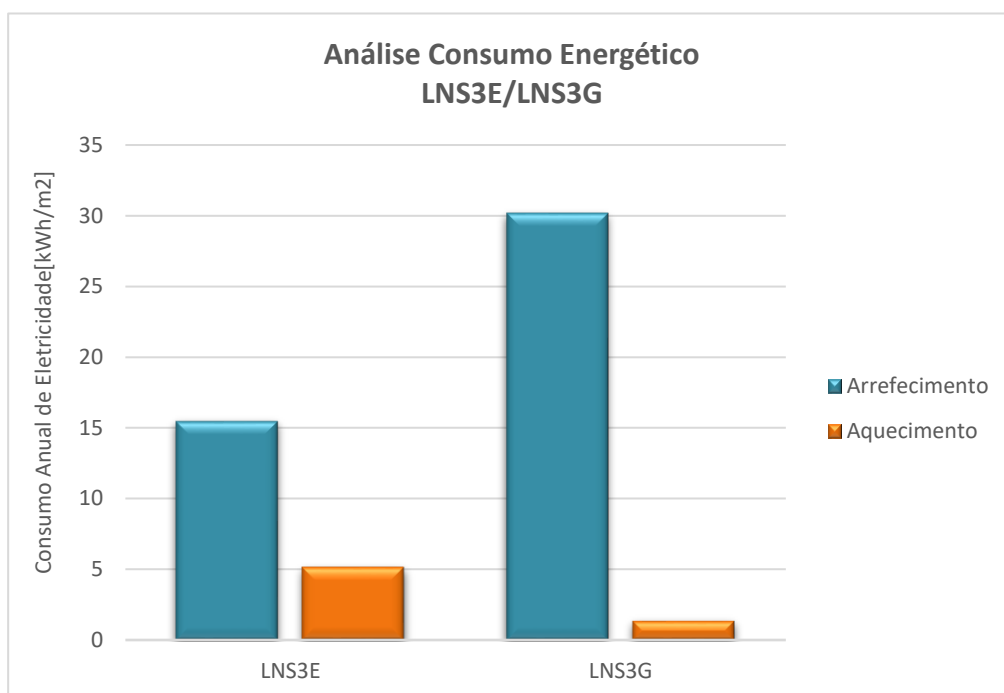


Figura 60 - Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros LNS3E e LNS3G.

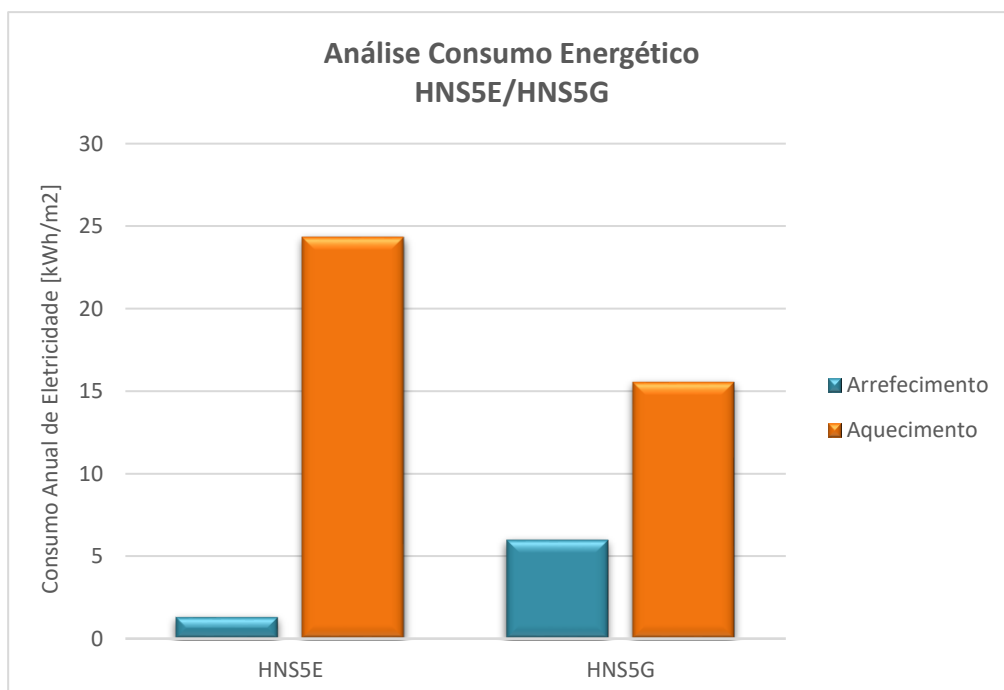


Figura 61- Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros HNS3E e HNS3G.

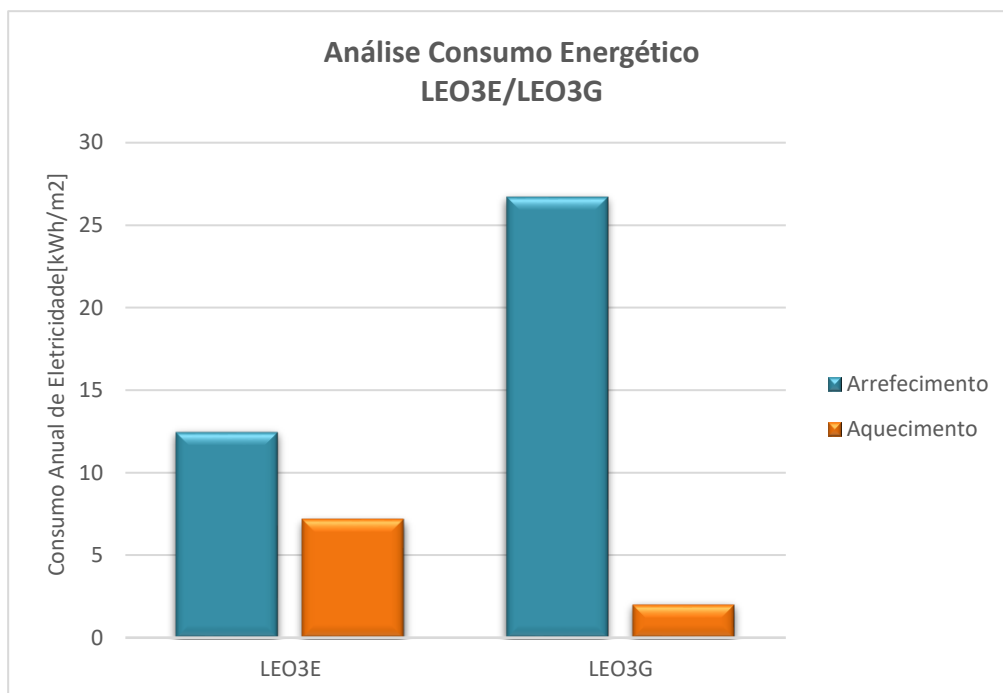


Figura 62- Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros LEO3E e LEO3G.

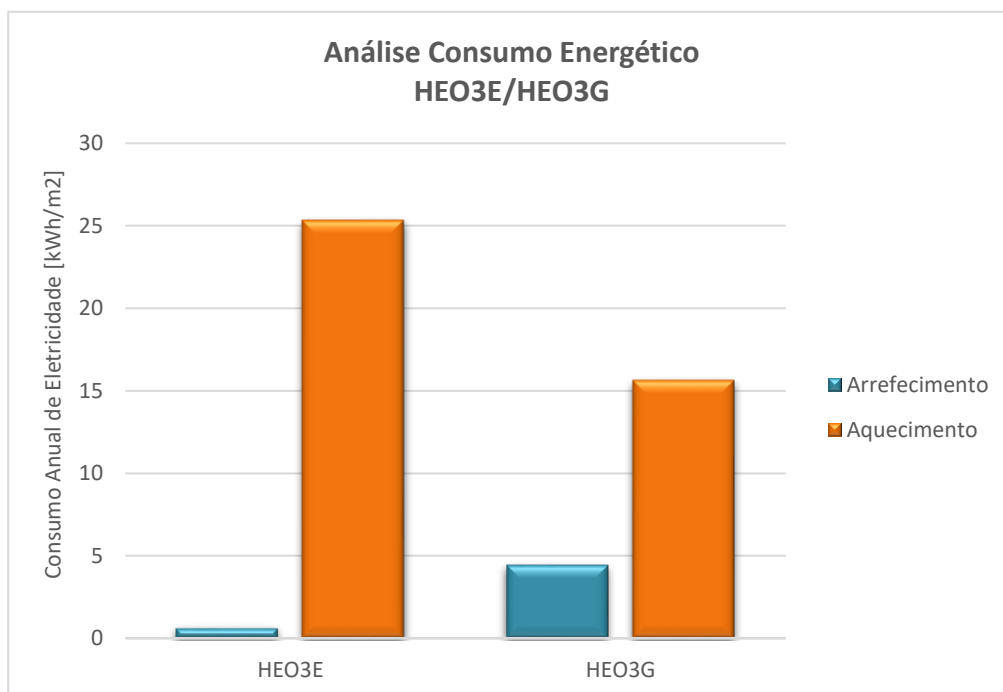


Figura 63- Comparação da influência de alteração do tipo de atividade metabólica nos conjuntos de parâmetros HEO3E e HEO3G.

Ao analisar os gráficos das figuras 60 a 63 é possível observar que, para todas as situações há uma tendência que se verifica, ou seja, a passagem de uma situação de escritório para ginásio, implica um aumento do consumo anual de eletricidade com vista ao arrefecimento e a uma diminuição do consumo anual de eletricidade com vista ao aquecimento. Para a localização de Lisboa, o consumo anual de eletricidade para o arrefecimento sobrepõe-se ao necessário para o aquecimento. No entanto, como mostra a situação da análise dos conjuntos de parâmetros LEO3E/LEO3G, a passagem de uma situação de atividade mais sedentária, para uma mais ativa, pode implicar um aumento de 53,3% do consumo anual de eletricidade com vista ao arrefecimento da zona. Em Helsínquia, por sua vez, são os consumos anuais de eletricidade com vista ao aquecimento que se sobrepõem aos consumos anuais de eletricidade com vista ao arrefecimento. No entanto, verifica-se que a situação de ginásio, prevê um aumento do consumo anual de eletricidade com vista ao arrefecimento, por exemplo na análise do conjunto de parâmetros HNS5E/HNS5G, verifica-se um aumento de 78,3% do consumo anual de eletricidade.

Outra análise possível de ser feita com os gráficos presentes nas figuras 60 a 63 é o facto de se poder determinar qual o tipo de atividade metabólica mais vantajosa para cada uma das localizações. Como se pode observar nas Figuras 60 e 61, para Lisboa, é mais vantajoso utilizar a construção modular para fins em que a atividade metabólica seja menor, ou seja, para atividades mais sedentárias, uma vez que, o total do consumo de eletricidade anual para a climatização da zona, é mais baixo que para uma atividade metabólica mais ativa. Por outro lado, o mesmo não se verifica para Helsínquia, que com recurso às figuras 62 e 63 é possível observar que é mais vantajoso, ao nível do consumo anual de eletricidade para climatização da zona, optar pela utilização da construção modular para um ginásio, por exemplo. Assim, é possível concluir que a atividade metabólica tem grande influência na variação do consumo anual de eletricidade associado à climatização da zona.

2.9 Propostas de Melhoria

Com a conclusão das análises realizadas anteriormente e em simultâneo com a discussão dos resultados obtidos, foi possível perceber que nem sempre o desempenho do módulo de construção modular em estudo é o mais eficiente. Desta forma, neste capítulo, pretende-se apresentar algumas propostas que visam melhorar o seu desempenho, do ponto de vista energético. Assim, pretende-se sujeitar os conjuntos de parâmetros que anteriormente apresentaram valores mais satisfatórios, a novas situações, que coincidem com as melhorias a serem propostas, de forma a otimizar e a melhorar a eficiência energética do módulo de construção modular para os respetivos parâmetros

As propostas de melhoria apresentadas neste capítulo, dizem respeito a uma proposta de melhoria associada ao clima de Lisboa e a uma proposta de melhoria associada ao clima de Helsínquia. Por este motivo, os conjuntos de parâmetros

selecionados correspondem ao LNS3E e HEO3G. Posteriormente, os valores resultantes destas simulações serão, então, comparados com os valores obtidos anteriormente, que serão tomados como valores de referência. Desta forma, as propostas de melhoria mencionadas anteriormente surgem associadas ao aumento da inércia térmica dos elementos construtivos do módulo de construção modular, no caso da localização de Lisboa, Portugal, que se demonstrou bastante fraca nas análises anteriores, e à otimização dos parâmetros associados aos sistemas de AVAC definidos, no caso da localização de Helsínquia, Finlândia.

2.9.1 Aumento da Inércia Térmica

Com a caracterização inicial da construção modular foi possível determinar uma estimativa do valor associado à inércia térmica da construção modular. No entanto, esse valor demonstrou que os materiais selecionados para a composição dos elementos construtivos satisfazem os requisitos estruturais, mas não satisfazem os requisitos do ponto de vista energético, uma vez que o valor de inércia térmica é quase nulo. Desta forma, a primeira melhoria prevê o aumento da inércia térmica associado a esta proposta de edifício de construção modular.

O requisito de modularidade e o requisito de fácil montagem, condicionam a alteração dos materiais que compõem as camadas dos elementos construtivos. Neste sentido, e como forma de contornar esta limitação, sugere-se que, no painel do pavimento, parte do isolamento de XPS seja removido e sejam introduzidas bolsas com água. Esta solução, do ponto de vista prático de montagem não implicaria problemas para o utilizador, uma vez, as bolsas de água só seriam cheias após a implantação da totalidade da construção modular, e por recurso a tubagem existente para o efeito.

A utilização de água na composição do pavimento é então tida em conta. Para isso, no *DesignBuilder*, acima da camada de XPS (cuja espessura foi reduzida) será, então, introduzida uma camada de 6mm de água, como mostra a figura 64. É importante salientar que o XPS será mantido como camada na composição do elemento construtivo, com vista a dar estabilidade e robustez ao painel do pavimento para que, assim, seja possível ao utilizador andar normalmente em cima do painel. A espessura de 6mm de água, surge do facto de no *software DesignBuilder* não ser possível definir os elementos construtivos como, neste caso, seriam na realidade. Desta forma, como foi mencionado inicialmente cada elemento construtivo é composto por 25 blocos, constituídos pelas três camadas de materiais definidos. Neste caso, a camada de XPS sofreria uma remoção de material onde permitisse a inclusão de uma bolsa de água de dimensões 300x200x100 mm. Sabendo que há 25 blocos que compõem o pavimento e tendo a volumetria mencionada anteriormente, o volume total de água distribuídos pelas bolsas seria de 0,15 m³. Com não é possível a criação destas bolsas no *DesignBuilder*, decidiu-se distribuir este volume de água pela área total do pavimento e, desta forma, obtém-se uma espessura, para efeitos representativos, de 6mm.

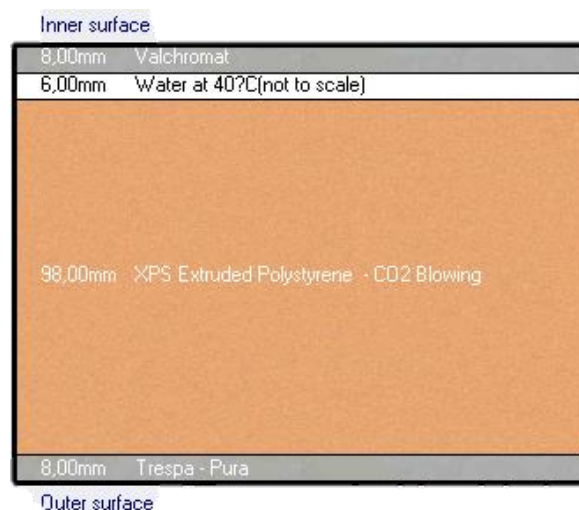


Figura 64 – Camadas que constituem o pavimento, com a sugestão de melhoria.

Dadas as características extremas do clima associado a Helsínquia, Finlândia, esta proposta de melhoria apenas será testada para a localização relativa a Lisboa, Portugal, uma vez que, para o clima mais frio, as bolsas de água estariam congeladas, anulando o efeito pretendido. Neste sentido, apenas se analisaram o conjunto de parâmetros LNS3E de forma a comparar com a situação de referência, testada e estudada anteriormente. Para a comparação dos valores, as figuras 65 e 66, ilustram as curvas dos outputs associados às condições ambientes e às cargas do sistema, de dois dias de uma semana de verão, para as condições de referência e para as novas condições, respetivamente. Por outro lado, as figuras 67 e 68, ilustram as curvas dos outputs associados às condições ambientes e às cargas do sistema, de dois dias de uma semana de inverno, para as condições de referência e para as novas condições, respetivamente.

Tendo em conta a informação presente nas figuras 65 a 68, é possível observar que, quer na situação de verão, quer na situação de inverno, o aumento da inércia térmica da construção modular, por via da introdução de bolsas de água no pavimento, implica algumas alterações, quer ao nível das condições ambiente, quer ao nível do consumo energético. Ao nível das condições ambiente, ou seja, da temperatura do ar interior, verifica-se que, fora do perfil de utilização, com a introdução das bolsas de água, a temperatura mínima que é atingida passa a ser cerca de 1°C inferior, no verão, e 2°C, no inverno. Estas alterações das amplitudes térmicas da temperatura do ar interior têm, também, influência direta no consumo energético. Desta forma, o consumo anual de eletricidade com vista à climatização (aquecimento e arrefecimento) da zona, diminui. O consumo total anual de eletricidade com vista à climatização da zona nas condições iniciais é 20,59 kWh/m², passando a ser, com a introdução das bolsas de água no pavimento, cerca de 19,33 kWh/m², ou seja, menos 1,26 kWh/m² anualmente. Por outro lado, se se analisar separadamente os novos consumos de eletricidade anual associados ao aquecimento e arrefecimento da zona, 5,75 kWh/m² e 13,57 kWh/m², respetivamente. Assim, é possível concluir que a introdução de bolsas de água no pavimento da construção modular, com vista ao aumento da inércia térmica, constitui uma melhoria

à solução inicialmente apresentada e tornando-se uma vantagem ao nível consumo energético anual, na localização de Lisboa, Portugal.

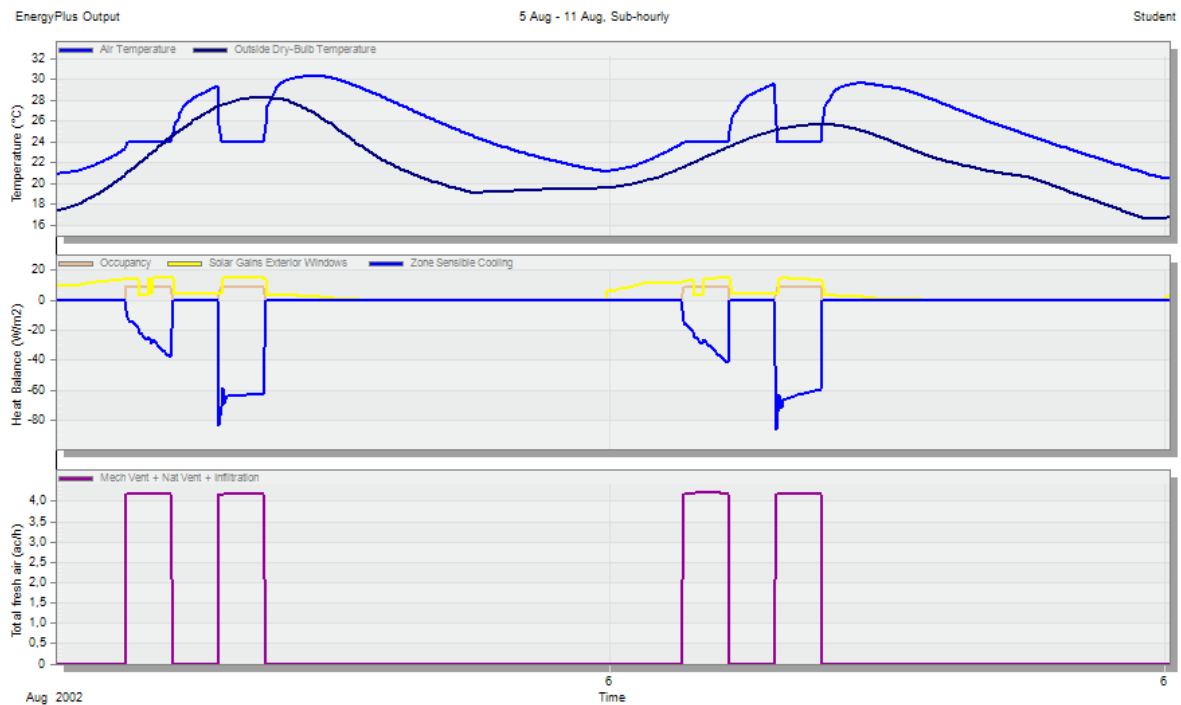


Figura 65 – Performance da construção modular, para dois dias numa semana de verão, para a situação de referência.

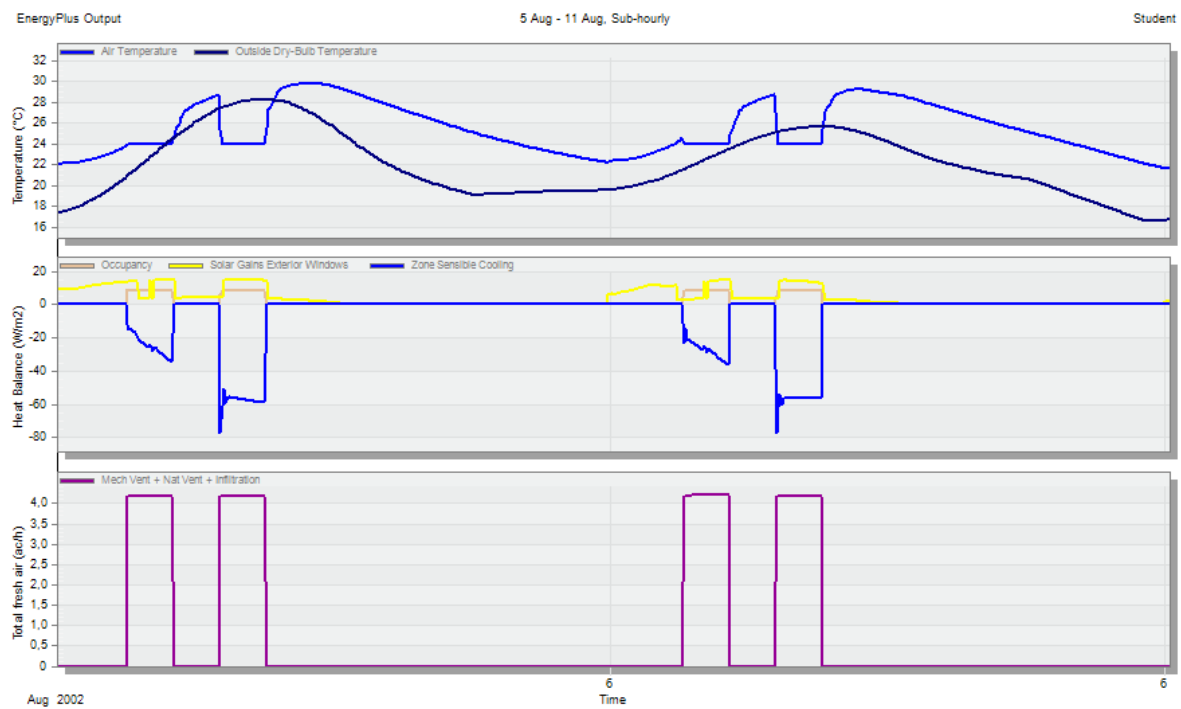


Figura 66- Performance da construção modular, para dois dias numa semana de verão, para a situação de melhoria.

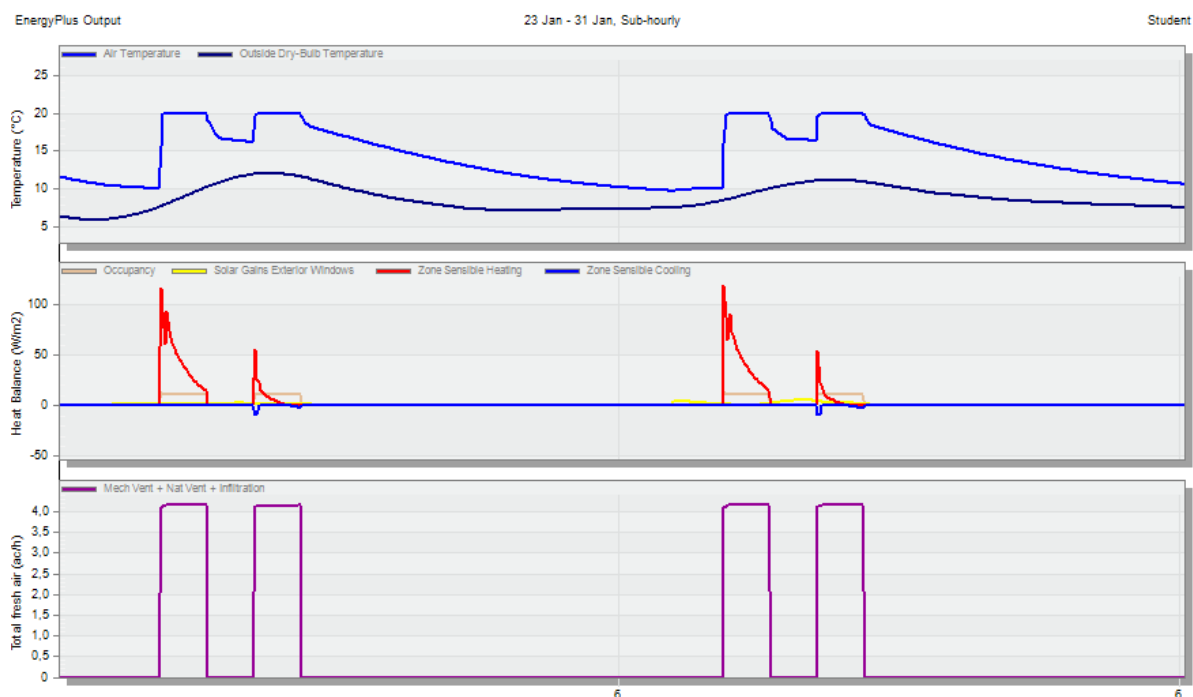


Figura 67- Performance da construção modular, para dois dias numa semana de inverno, para a situação de referência.

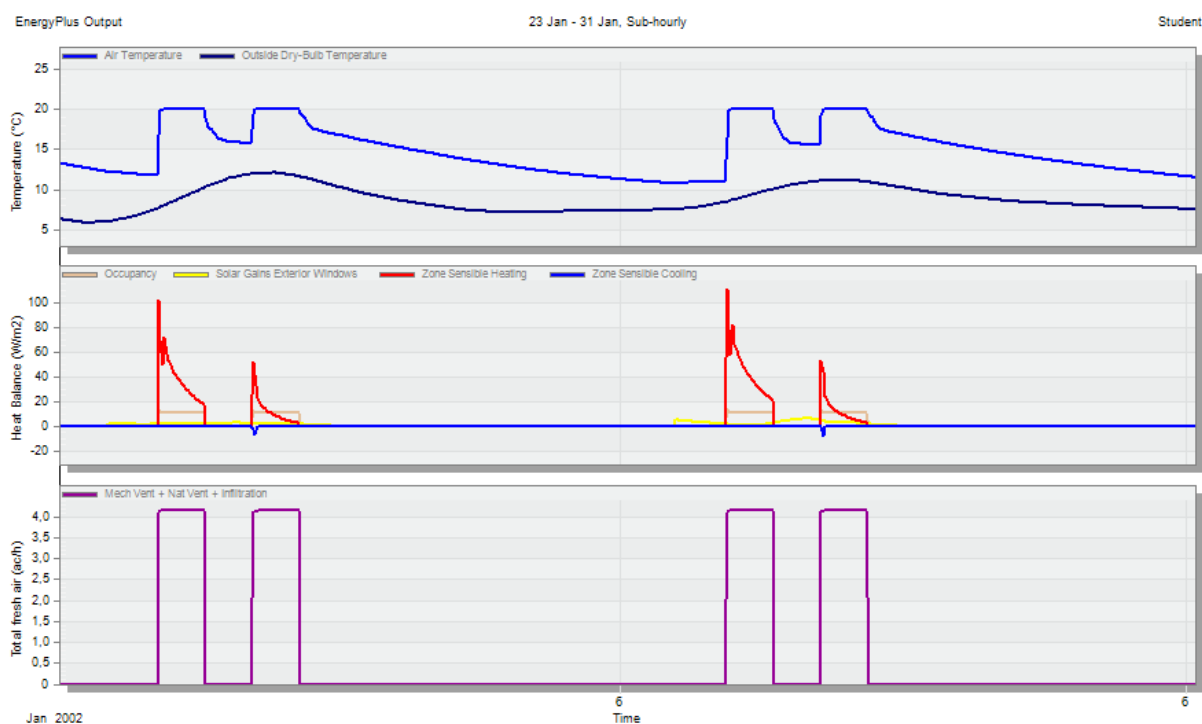


Figura 68- Performance da construção modular, para dois dias numa semana de inverno, para a situação de melhoria.

2.9.2 Configuração do Sistema AVAC

Com a análise feita anteriormente, para todos os conjuntos de parâmetros, foi possível observar que, para a localização de Helsínquia, há uma diferença nos valores do consumo de eletricidade para o aquecimento e arrefecimento da zona ocupada, sendo os valores associados ao arrefecimento bastantes inferiores aos associados ao aquecimento. No entanto, os valores estão de acordo com o que seria espectável dado as características climáticas desta localização.

Tendo, então, por base a análise anterior, a proposta de melhoria sugerida para o clima associado à localização de Helsínquia, prevê a configuração do sistema AVAC de forma a que apenas esteja previsto o arrefecimento da zona ocupada durante a estação de verão (de abril a setembro). Desta forma, é possível diminuir o consumo energético associado à climatização da zona ocupada da construção modular. No entanto, estas alterações podem implicar um aumento do número de horas de desconforto dos ocupantes da construção modular. Assim, será feita uma análise com base no *output* do número de horas de desconforto associado à distribuição da temperatura, fornecido pelo *software DesignBuilder*. O objetivo é comparar a distribuição de temperatura da simulação de referência do conjunto de parâmetros HNS3G, com a nova distribuição de temperatura obtida para o mesmo conjunto de parâmetros, mas com a nova configuração do sistema AVAC.

Desta forma, a análise do número de horas de desconforto será feita para o período entre maio e setembro, tendo em conta que o número de horas ocupadas neste espaço de tempo é de 612 horas, de acordo com o perfil de utilização definido para a construção modular. Desta forma, são aceitáveis cerca de 18,36 horas em que a temperatura operacional pode exceder a temperatura limite de conforto, isto é, os 26°C (CIBSE, 2013). Assim, figura 69 ilustra, para o conjunto de parâmetros HEO3G, os valores obtidos para a distribuição de temperaturas, para a situação de referência, e a figura 70 ilustra, para o mesmo conjunto de parâmetros, os valores obtidos para a distribuição de temperaturas, para a nova configuração do sistema AVAC. A comparação das duas figuras irá permitir observar a variação do número de horas de desconforto associadas à nova configuração do sistema de AVAC, onde não se prevê o arrefecimento da zona durante a estação de inverno.

Ao configurar o sistema AVAC de forma a que o arrefecimento da zona ocupada só se verifique na estação de arrefecimento, o consumo anual de eletricidade associado ao arrefecimento passa de 4,41 kWh/m² para 4,38 kWh/m², ou seja, uma diminuição de apenas 0,5%, num ano. No entanto, tendo em conta o critério definido pela CIBSE, definido anteriormente, o período crítico de análise é um intervalo de tempo referente a uma estação típica de não aquecimento (1 de maio a 30 de setembro). Desta forma, a sugestão de melhoria proposta não influencia os valores obtidos para este intervalo de tempo, segundo este critério, uma vez que, a desativação da função de arrefecimento está associada aos meses de inverno. Por outro lado, o recurso a este critério, indica que, para a situação de referência, de acordo com a Figura 68, o número de horas de

desconforto em que a temperatura operacional pode exceder a temperatura limite de conforto, em um ou mais graus, é de 76 horas, pelo que ultrapassa as 18,36 horas definidas pela CIBSE. No entanto, como o sistema AVAC está definido para garantir os níveis de conforto no interior da construção modular, o número em excesso de horas de desconforto pode ser atribuído à soma dos primeiros instantes do perfil de utilização, uma vez que o só se verifica a climatização da zona durante o intervalo de tempo do mesmo.

Desta forma, pode concluir-se que, apesar de a construção modular associada a este conjunto de parâmetros não garantir os valores previstos pelo Critério de Horas de Excedência, definido pela CIBSE, a proposta sugerida de desativar a função de arrefecimento durante os meses de inverno, melhora de forma pouco significativa, os consumos anuais da construção modular. No entanto, mesmo que pouco significativa numa situação isolada, a redução anual de 0,5% do consumo anual de eletricidade com vista à climatização da zona, pode ser uma mais valia numa perspetiva de massificação.

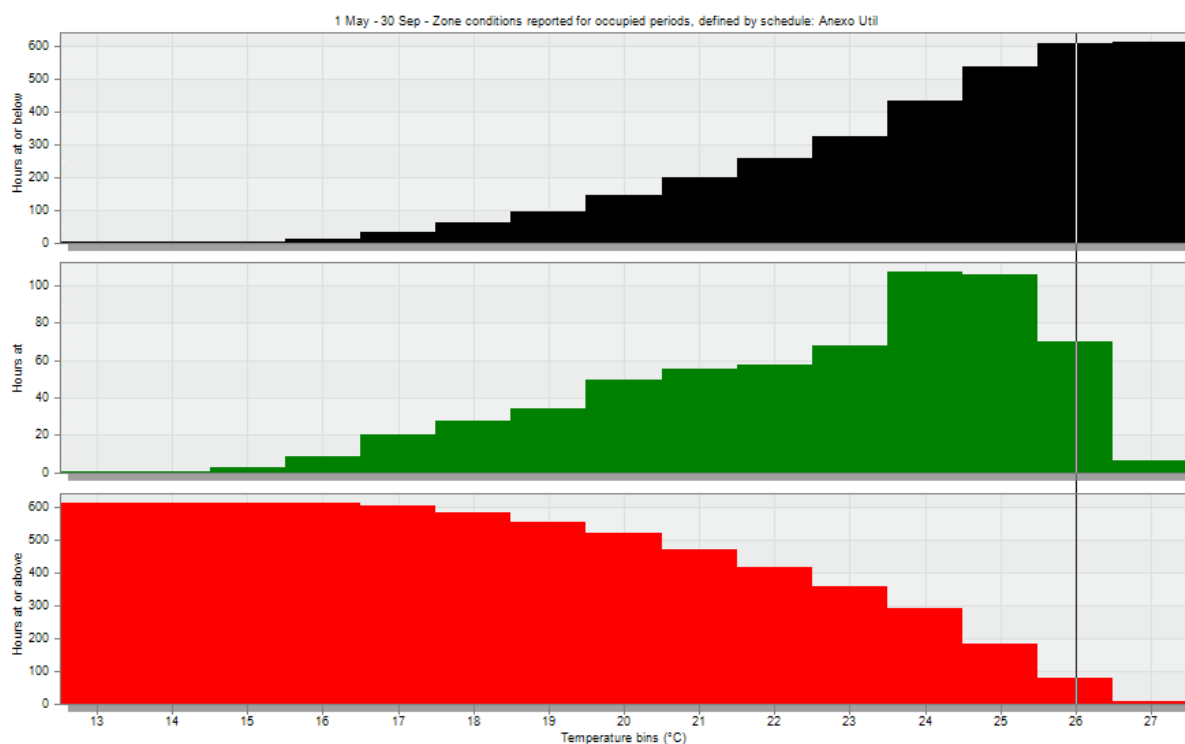


Figura 69 – Número de horas de desconforto tendo em conta a situação de referência.

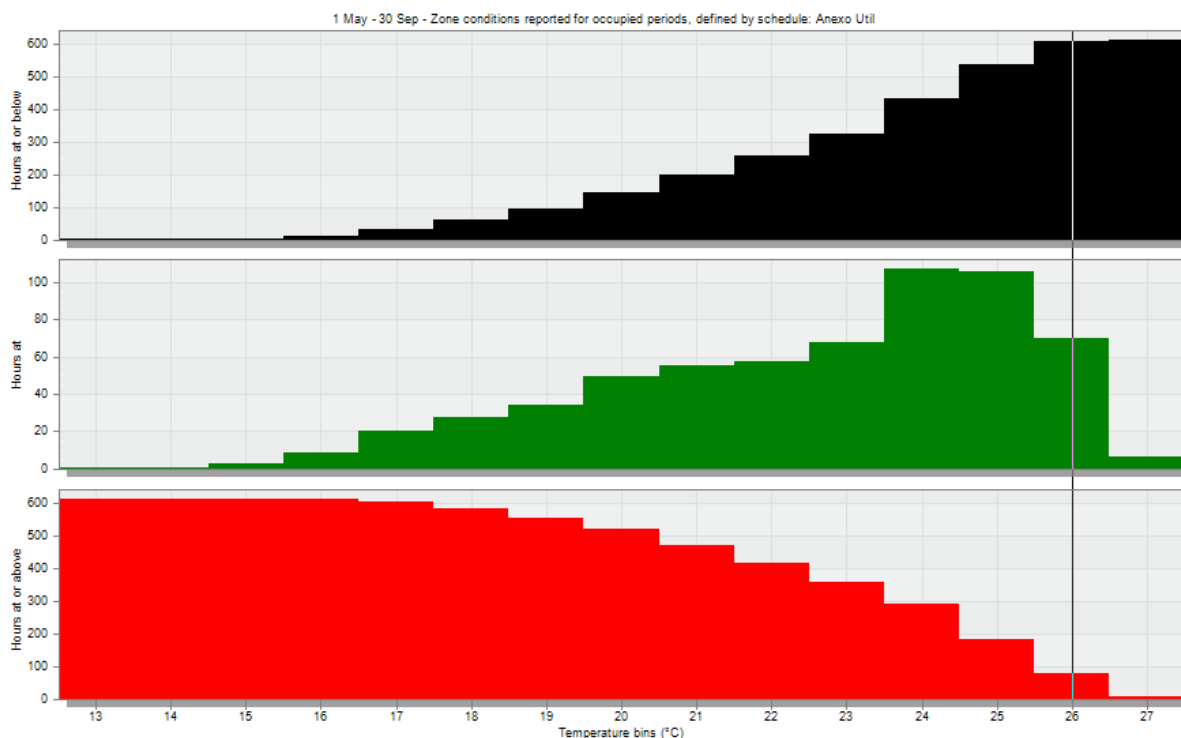


Figura 70– Número de horas de desconforto tendo em conta a situação de melhoria.

2.10 Resumo e Conclusões do Capítulo

No contexto do projeto energético da construção modular, muitos são os fatores e parâmetros que são necessários considerar. A localização, a orientação, o número de janelas e o tipo de atividade metabólica foram, ao longo deste projeto, os principais fatores, alvo de análise. Como durante a definição do sistema AVAC se garantiu que o conforto térmico no interior do espaço seria sempre assegurado, então, os valores associados ao consumo energético tornaram-se a base de todas as análises efetuadas. Devido aos requisitos impostos ao produto e as suas especificações, foi possível definir dois tipos de localizações diferentes, bem como definir os tipos de materiais a serem utilizados nos elementos construtivos do edifício modular, considerando que a escolha destes materiais deve garantir que a montagem seja feita apenas por uma pessoa, dada a massa dos blocos. Por outro lado, definiu-se também duas orientações tipo e, ainda, dois tipos de atividades metabólicas extremas, uma mais sedentária (escritório) e outra mais ativa (ginásio). O número de janelas, isto é, a percentagem de envidraçado foi outro dos parâmetros considerados.

Antes de realizar qualquer tipo de simulações, foi realizado um estudo paramétrico com o objetivo de analisar a performance do edifício. Para isso, foi considerada a toda a caracterização da construção modular, bem como da definição de cada um dos sistema AVAC. Desta forma, foi possível observar o comportamento da mesma recorrendo a diversos *outputs*, onde, numa primeira análise, foi necessário ajustar

alguns campos associados ao sistema AVAC, no caso da localização associada a Lisboa. Após estas configurações, foi possível determinar que todas as considerações feitas permitiam a obtenção de resultados credíveis e fidedignos e que, o modelo analisado, poderia então servir de ponto de partida para todas as outras simulações a serem realizadas.

Para analisar a variação do número de janelas do edifício de construção modular, em primeiro lugar, foi necessário definir as suas dimensões. Desta forma, e recorrendo a uma análise de consumos energéticos, fazendo variar a localização, foi, então, possível definir as dimensões da construção modular como 0,80x0,80 m.

Com a definição das dimensões das janelas, seguiu-se a análise do consumo energético sujeitando a construção modular a dezasseis conjuntos de parâmetros diferentes. Devido ao elevado número de resultados, optou-se por analisar de forma isolada a influência de cada um dos parâmetros no consumo energético. Desta forma, observou-se que a localização influencia de forma significativa o consumo energético associado à construção modular. Por outro lado, a orientação revelou-se um parâmetro pouco significativo no que diz respeito à variação dos valores de consumo energético da construção modular. Como seria de esperar, o número de janelas, também, influencia os valores associados ao consumo energético, uma vez que se torna mais vantajoso uma solução que passe pela utilização de apenas três janelas. Estes valores já seriam espectáveis, uma vez que, aquando a determinação das dimensões das janelas já se tinha verificado que a solução que apresentava valores mais satisfatórios era a que previa menor percentagem de envidraçado. Por último, a análise isolada do parâmetro associado ao tipo de atividade metabólica, indica que este tem grande influência os consumos energéticos no interior da construção modular, para assegurar os níveis de conforto interior.

Tendo em conta os valores obtidos nesta análise, foi possível observar que nem sempre esta proposta de construção modular teve o comportamento mais eficiente. Desta forma, foram propostas duas sugestões de melhoria com vista a aumentar a eficiência energética do edifício, em cada uma das localizações consideradas. Assim, para Lisboa recorreu-se ao conjunto de parâmetros LNS3E, por ter sido o que apresentou melhores resultados em termos de consumo energético, na primeira análise, e foi, então, sujeito a uma nova análise em que se fez aumentar a inércia térmica dos elementos construtivos ao adicionar água ao nível do painel do pavimento. Desta forma, observou-se que foi possível melhorar ligeiramente os valores do consumo energético da construção modular. Por outro lado, para Helsínquia, como não é possível adotar a estratégia da introdução da água, dadas as características extremas do clima, sugeriu-se uma nova parametrização do sistema AVAC que foi analisado com base na variação do número de horas de desconforto dos ocupantes da construção modular, para o conjunto de parâmetros HEO3G. Assim, foi possível observar que ao se eliminar a função de arrefecimento da zona, nos meses de inverno, é possível diminuir cerca de 0,5% o consumo energético anual da construção modular, mesmo que a construção modular não cumpra o Critério de Horas de Excedência, definido pela CIBSE.

3. Projeto Energético com Tenda

3.1 Sumário

Aquando da caracterização desta proposta de edifício de construção modular, foi definido que a cobertura do mesmo seria plana. No entanto, do ponto de vista estrutural, este pode ser um fator do qual poderão resultar alguns problemas. Nomeadamente zona de ligação dos módulos de 2,5x2,5m (para perfazer o módulo de 5x5), pode-se originar uma zona de infiltração de água acumulada da chuva, uma vez que, a cobertura plana não permite o seu escoamento.

Perante este problema estrutural, surge como solução a possibilidade de envolver a estrutura da construção modular por uma tenda. Assim, não se verificaria a passagem de água, logo, não haveria acumulação sobre a cobertura plana. No entanto, a introdução da tenda, do ponto de vista energético, teria influência no desempenho da edificação modular. Assim, surge a necessidade de se realizar um estudo energético englobando a tenda e o edifício modular.

Para este estudo, foram selecionadas, novamente, os dois conjuntos de simulações que apresentaram resultados mais satisfatórios nas análises anteriores, ou seja, LEO3E e HEO3G. Com estes dois conjuntos de parâmetros é então possível observar, para ambos os climas, qual a influência da utilização da tenda na variação do consumo energético. De notar que, as simulações realizadas nestes capítulo preveem as condições iniciais da construção modular, ou seja, não foram aplicadas nenhuma das melhorias propostas anteriormente.

3.2 Estratégias Utilizadas

Para desenvolver este projeto energético, em primeiro lugar, foi necessário definir uma tenda no *software DesignBuilder*. Como o programa não prevê a existência da configuração de tenda na sua base de dados foram propostas duas estratégias para criar uma situação que aproximasse ao interior de uma tenda. Para o caso desta análise em concreto, optou-se por estudar a situação extrema em que a tenda é translúcida e completamente fechada.

Estratégia 1 – Component Block

A primeira estratégia a ser utilizada foi recorrer à ferramenta *componente block*, disponibilizada pelo *software*. Desta forma, criaram-se 5 blocos, com 2mm de espessura, que todos juntos perfazem uma tenda com a mesma forma da construção modular e que se encontra afastada 1m afastada da mesma. A figura 71 ilustra a situação descrita. A utilização do *componente block* surge como possibilidade, uma vez que, o espaço criado entre a tenda e a construção modular não fica definido como “zona”, ou seja, quando o

processo de simulação a única área que é considerada é a “zona” interior da construção modular.

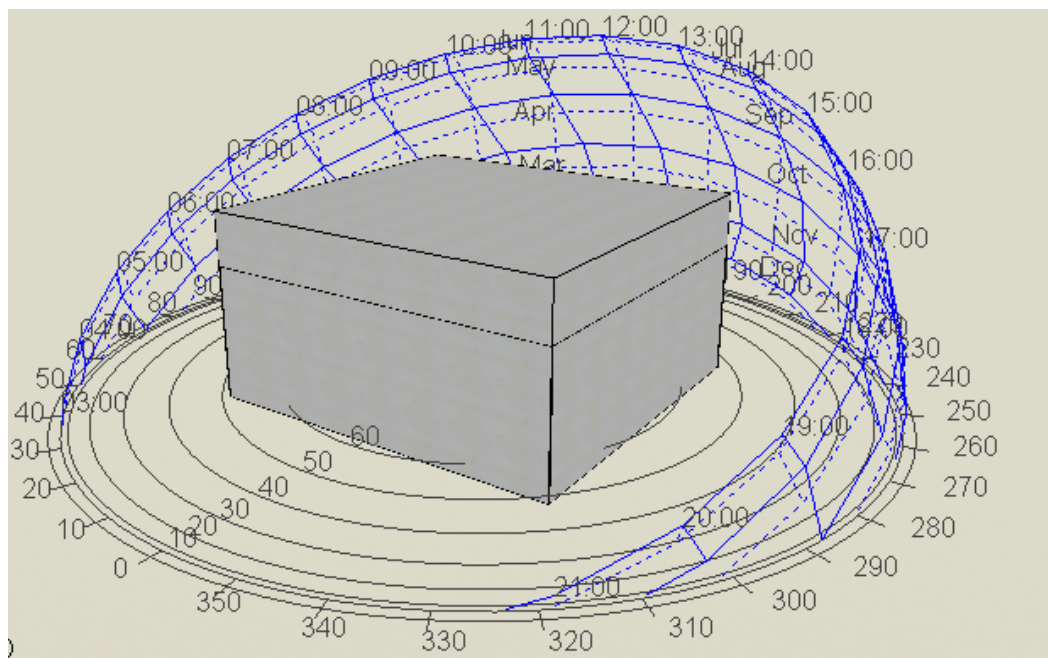


Figura 71- Criação da estrutura da tenda com recurso à ferramenta *Component Block*.

Estratégia 2 – Plenum

A segunda estratégia utilizada, consistiu em construir uma “tenda” envolvente à construção modular, no entanto utilizando o *block* normal. Ao criar esta estrutura envolvente de 2mm, para além da “zona,” associada à área interior da construção modular e que é a zona de interesse de estudo, surge, também, uma “zona” envolvente à construção. Desta forma, esta zona envolvente é definida como *Plenum*, ou seja, significa que esta área é desocupada e não tem aquecimento, arrefecimento ou ventilação mecânica.

Em termos de elementos construtivos, esta estratégia leva a que tudo o que era considerado paredes exteriores e cobertura, agora, se torne partições interiores e cobertura não ocupada, respetivamente. Assim, as paredes exteriores dizem respeito à nova estrutura criada que envolve a construção modular e que faz a vez de uma tenda.

Para criar a situação de tenda fechada translúcida, a solução encontrada teve por base tornar todas as paredes exteriores e a cobertura em 100% vidro, tal como mostra a figura 72.

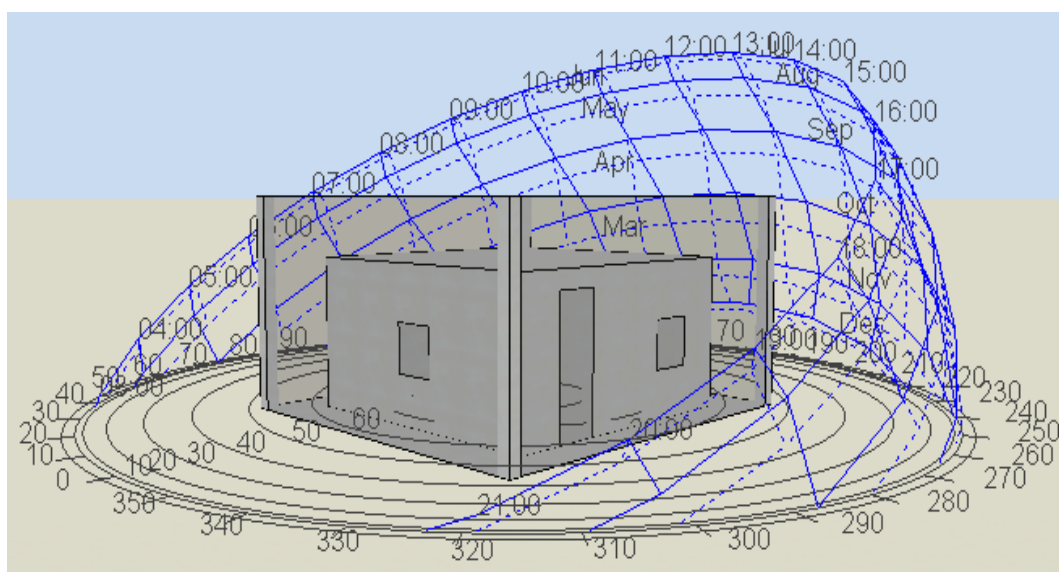


Figura 72- Criação da estrutura da tenda com recurso à ferramenta *Plenum*.

3.3 Análise de Consumo Energético com Tenda

Após terem sido definidas as duas estratégias anteriores, procedeu-se às simulações dos conjuntos de parâmetros LNS3E e HEO3G, para ambas as situações. De forma a poder comparar os resultados e tirar conclusões, nas tabelas 19 e 20 estão presentes os valores obtidos, para os dois conjuntos de simulações mencionados, relativos às cargas do sistema e ao consumo de eletricidade, para as estações de verão e de inverno, respetivamente, de forma a representarem os valores de referência. Novamente, são, também, apresentados os valores dos COP semestrais médios, de aquecimento e de arrefecimento, uma vez que o objetivo da presente análise não é estudar a influência da variação do sistema de AVAC de uma localização para a outra, mas sim, a influência da introdução de uma estrutura envolvente à construção modular, semelhante a uma tenda, ao nível do consumo energético.

Os valores obtidos nestas análises, são referentes a estação de arrefecimento, verão, e para a estação de aquecimento, inverno. Desta forma, é importante referir que se considerou o “verão” e o “inverno, definidos pelo *software DesignBuilder*, sendo que, a estação de arrefecimento corresponde ao intervalo de tempo de 1 de abril a 30 de setembro e a estação de aquecimento, corresponde ao intervalo de tempo de 1 de outubro a 31 de março. É ainda de salientar que, também neste estudo está previsto que os níveis de conforto térmico definidos, no interior da construção modular, sejam sempre garantidos.

Tabela 19-Valores de referência do consumo energético, no verão, para Lisboa e Helsínquia.

	Consumo Energético - Verão					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CEAQ [kWh/m ²]	CEAR [kWh/m ²]	COP médio aquecimento	COP médio arrefecimento
LNS3E	1,66	-29,25	0,67	11,84	2,5	2,5
HEO3G	5,33	-15,34	1,45	4,36	3,7	3,5

Tabela 20- Valores de referência do consumo energético, no inverno, para Lisboa e Helsínquia

	Consumo Energético - Inverno					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CEAQ [kWh/m ²]	CEAR [kWh/m ²]	COP médio aquecimento	COP médio arrefecimento
LNS3E	13,63	-5,25	4,45	3,60	3,1	1,5
HEO3G	51,47	-	14,14	-	3,6	-

A estratégia 1, que utilizou o *component block*, foi a primeira a ser testada e analisada. Os resultados obtidos relativamente a esta simulação estão presentes nas tabelas 21 e 22, e ilustram os valores obtidos para os consumos médios das cargas de arrefecimento e aquecimento, para cada uma das estações do ano.

Tabela 21- Valores do consumo energético, no verão, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do *Component Block*.

	Consumo Energético – Verão – <i>Component Block</i>					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CEAQ [kWh/m ²]	CEAR [kWh/m ²]	COP médio aquecimento	COP médio arrefecimento
LNS3E	5,18	-10,13	1,79	5,81	2,9	1,7
HEO3G	8,24	-5,71	2,29	1,60	3,6	3,6

Tabela 22- Valores do consumo energético, no inverno, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do *Component Block*.

	Consumo Energético – Inverno – <i>Component Block</i>					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CEAQ [kWh/m ²]	CEAR [kWh/m ²]	COP médio aquecimento	COP médio arrefecimento
LNS3E	30,77	-0,20	8,50	0,40	3,6	0,5
HEO3G	55,14	-	14,13	-	3,9	-

Ao analisar os resultados das tabelas 21 e 22 e ao compará-los com os valores de referência presentes nas tabelas 19 e 20, é possível observar que os valores melhoram em termos de consumo energético. No entanto, a presente situação prevê retratar uma situação de uma tenda fechada que, à partida, intensificaria, no seu interior, o efeito de estufa. Desta forma, seria natural que o valor associado ao consumo de eletricidade para efeitos de arrefecimento aumentasse, quer para a situação de Lisboa, quer para a situação de Helsínquia, mas tal não se verifica. Por outro lado, também seria espectável que o consumo de eletricidade associado ao aquecimento da zona baixasse, mas os valores obtidos demonstram um aumento aquando a introdução de uma tenda envolvente.

Desta forma, com os resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização da ferramenta *component block*, não pode ser adotada para a criação de uma situação de tenda, pois esta solução, com base nos resultados obtidos, funciona como uma situação de sombreamento.

À semelhança do procedimento realizado para analisar a estratégia 1, os resultados obtidos associados à simulação da situação criada pela estratégia 2 são apresentados nas tabelas 23 e 24, e ilustram, respetivamente, os valores obtidos para as cargas do sistema e para o consumo de eletricidade associada à climatização da zona, para as estações de arrefecimento e aquecimento.

Tabela 23- Valores do consumo energético, no verão, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do *Plenum*.

	Consumo Energético – Verão – <i>Plenum</i>					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CEAQ [kWh/m ²]	CEAR [kWh/m ²]	COP médio aquecimento	COP médio arrefecimento
LNS3E	1,31	-41,93	0,46	15,45	2,9	2,7
HEO3G	4,52	-17,72	1,31	5,29	3,5	3,3

Tabela 24- Valores do consumo energético, no inverno, para Lisboa e Helsínquia, utilizando a estratégia do *Plenum*.

	Consumo Energético – Inverno – <i>Plenum</i>					
	Aquecimento da Zona [kWh/m ²]	Arrefecimento Total [kWh/m ²]	CEAQ [kWh/m ²]	CEAR [kWh/m ²]	COP médio aquecimento	COP médio arrefecimento
LNS3E	10,85	-14,41	3,51	6,34	3,1	2,3
HEO3G	50,65	-	14,05	-	3,6	-

Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos relativamente à estratégia 2, com os valores de referência, serão apresentados na forma gráfica os valores presentes na tabela 23 e na tabela 24. As figuras 73 e 74 irão, então, comparar os valores relativos à localização de Lisboa, no verão e no inverno, respetivamente, sendo que, da mesma forma, as figuras 75 e 76 irão permitir a comparação dos valores relativos à localização de Helsínquia

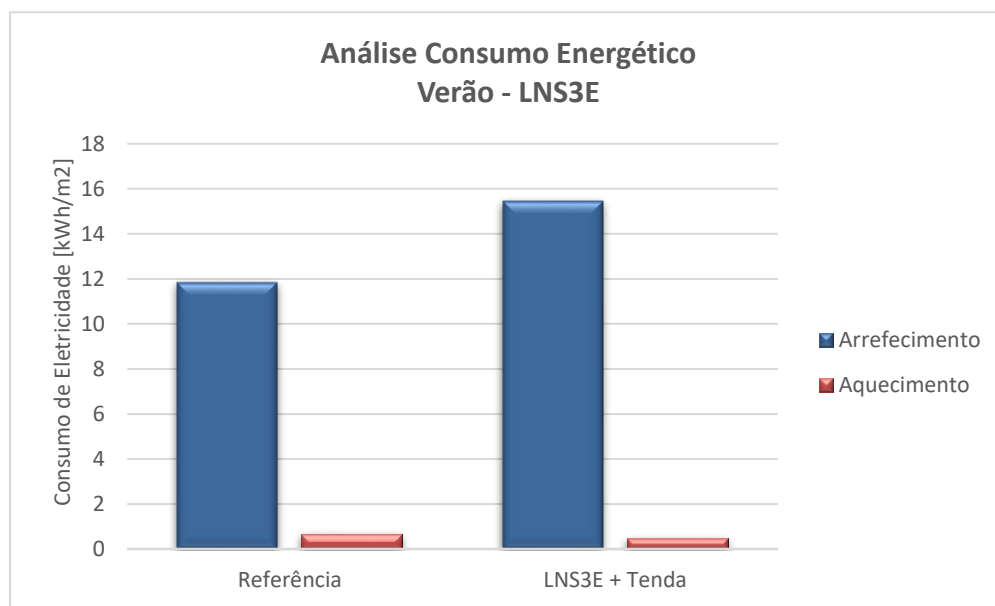


Figura 73 – Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no verão, para Lisboa, Portugal.

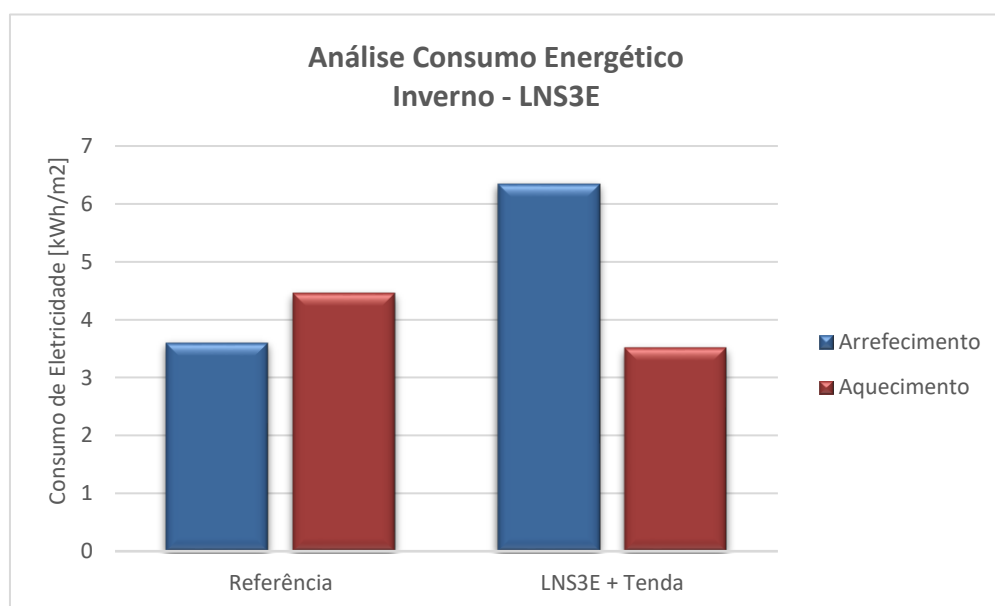


Figura 74 - Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no inverno, para Lisboa, Portugal.

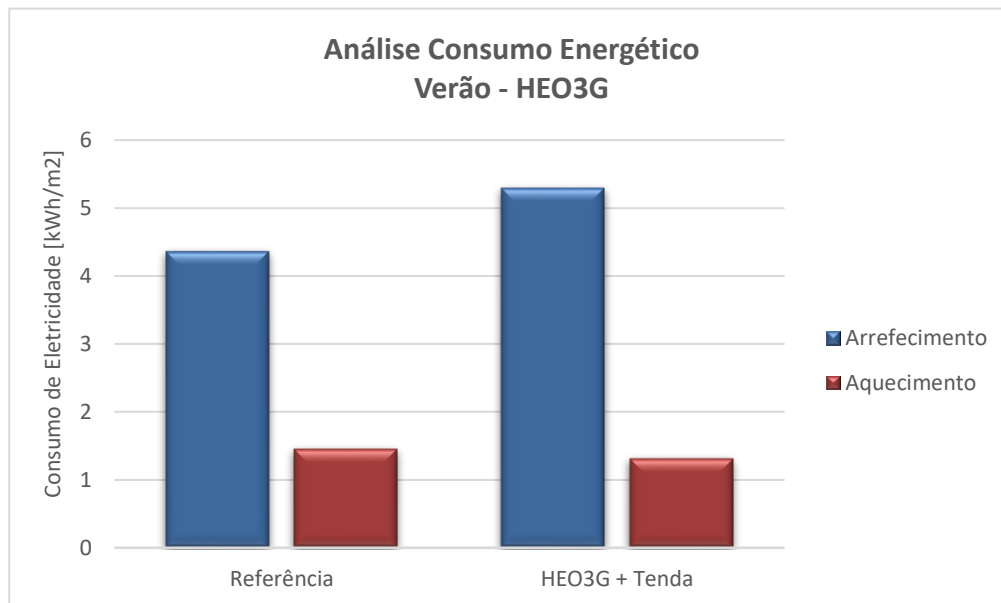


Figura 75- Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no verão, para Helsínquia, Finlândia.

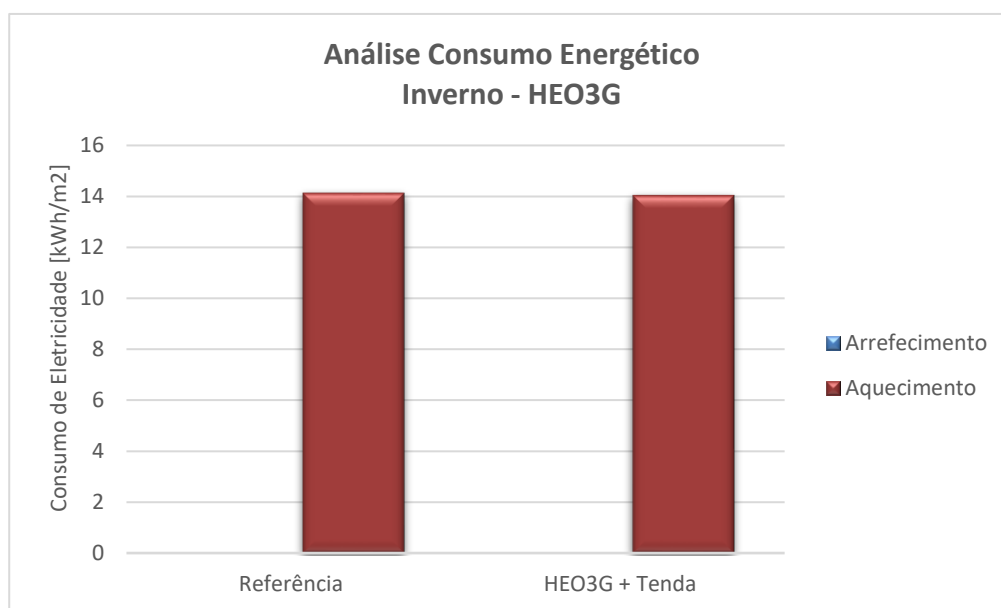


Figura 76 - Influência da introdução da tenda no consumo anual de eletricidade, no inverno, para Helsínquia, Finlândia.

Como é possível observar nos gráficos presentes nas figuras 73 a 76 a estratégia utilizada, estratégia 2, permite a obtenção de valores que vão de encontro ao que seria espetável obter com a introdução de uma tenda envolvente à estrutura da construção modular. Nas figuras 73 e 74 observa-se que, para Lisboa, quer no verão, quer no inverno, a introdução da tenda implica um aumento do consumo de eletricidade com vista ao

arrefecimento da zona e uma diminuição do consumo de eletricidade associado ao aquecimento. Estas variações já seriam espectáveis dado o efeito de estufa criado no novo espaço envolvente à construção modular. Os valores obtidos permitem, ainda perceber que a introdução da tenda, nesta localização, quer no verão, quer no inverno, se torna uma solução desvantajosa, do ponto de vista energético, uma vez que, mesmo com a diminuição do consumo de eletricidade associado ao aquecimento, há uma necessidade ainda maior do consumo de eletricidade para arrefecer a zona. No verão, verifica-se um aumento do consumo de eletricidade para arrefecer a zona de 23,4% e, no inverno, para as mesmas necessidades verifica-se um aumento de 43,2%.

Relativamente à localização de Helsínquia, as condições extremas do clima, principalmente no inverno, levam a que a introdução de uma tenda envolvente à estrutura da construção modular não faça variar o consumo de eletricidade como seria espectável. No verão, verifica-se um aumento do consumo de eletricidade necessário ao arrefecimento da zona maior do que a diminuição da necessidade de consumo de eletricidade com vista ao aquecimento. Por outro lado, no inverno, nesta localização, as horas com luz solar são bastante reduzidas, pelo que, apenas se verifica uma diminuição 0,63% do consumo de eletricidade para a climatização da zona, com a introdução da tenda, uma vez, que o efeito de estufa é praticamente inexistente.

3.4 Resumo e Conclusões do Capítulo

A utilização de uma tenda como uma estrutura envolvente à construção modular surge com base na necessidade de dar resposta a um problema construtivo. No entanto, é necessário estudar quais as consequências da adoção desta solução ao nível energético.

A criação de uma solução construtiva que representasse as condições semelhantes às criadas por uma tenda, no *software DesignBuilder*, foi a primeira etapa a ser concretizada. Desta forma, foram definidas duas estratégias diferentes para o conseguir e que foram posteriormente utilizadas nas simulações, em simultâneo com os conjuntos de parâmetros LEO3E e HEO3G. Assim, verificou-se que a estratégia 1 não era representativa da situação prevista, pois a estrutura envolvente criada apresentou valores relativos ao aumento do sombreamento. Por outro lado, a estratégia 2, permitiu obter resultados que seriam espectáveis aquando a introdução de uma tenda a envolver a construção modular.

Com a análise feita anteriormente, foi possível concluir que a introdução de uma tenda completamente fechada envolvente à estrutura da construção modular se torna numa desvantagem relativamente à localização de Lisboa, uma vez que se verificam aumentos significativos nos consumos necessários ao arrefecimento da zona, para efeitos de climatização. Por outro lado, para Helsínquia, apesar de se verificar, no verão, um aumento do consumo de eletricidade com vista ao arrefecimento da zona, a introdução de uma tenda pode vir a ser uma vantagem do ponto de vista energético.

Assim, conclui-se que a aplicação da situação extrema de uma tenda translúcida completamente fechada para dar resposta a problemas construtivos, em Lisboa, não é vantajosa do ponto de vista energético. No entanto, em Helsínquia poderia ser adotada sem que o impacto na variação do consumo de eletricidade com vista à climatização da zona seja significativo.

4. Conclusões e Trabalhos Futuros

4.1 Síntese e Análise de Resultados

Para o desenvolvimento do projeto energético foi importante, numa primeira fase, definir e caracterizar o módulo e o edifício de construção modular, quer ao nível dos requisitos impostos ao mesmo, quer ao nível das suas dimensões, volumetrias, função e materiais utilizados na construção do mesmo. Estas considerações foram impostas e surgiram com base no desenvolvimento da solução construtiva e que visam, agora, ser estudadas e analisadas do ponto de vista energético. Desta forma, definiram-se quatro parâmetros que se consideraram fundamentais serem analisados, uma vez que, a sua variação pode ter influência ao nível energético. Os parâmetros referidos dizem, então, respeito à localização, à orientação, ao número de janelas e ao tipo de atividade física e foram consideradas, para cada um deles, duas situações extremas, ou seja, ao nível da localização considerou-se um clima temperado associado a Lisboa, Portugal, e um clima frio e rigoroso associado à localização de Helsínquia, Finlândia. Para a orientação, fez-se variar a implantação da construção modular numa orientação Norte/Sul e numa orientação Este/Oeste. Relativamente ao número de janelas, que foram sujeitas a uma análise e definidas com as dimensões úteis de 0,80x0,80 m, fizeram-se variar entre 3 e 5. Finalmente relativamente ao tipo de atividade metabólica, considerou-se uma atividade mais sedentária, aproximada a uma situação de escritório, e uma mais ativa, aproximada a uma situação de ginásio. Para além da definição destes parâmetros, foi, também, fundamental a configuração dos dois sistemas AVAC, um associado a Lisboa e outro associado a Helsínquia, e a sua validação através de um estudo paramétrico que permitiu determinar que os valores obtidos são fidedignos e que vão de encontro ao que seria expectável. Foi também, através da configuração dos sistemas AVAC, que se garantiu que o nível de conforto térmico no interior da construção modular seria sempre garantido. Desta forma, a análise a ser feito ao longo deste trabalho, visa a variação do consumo energético, uma vez que, está definido que o conforto térmico seja sempre garantido. Para além dos dois sistemas de AVAC diferentes, é também importante referir, que, para Helsínquia, foi considerada uma parede dupla como ponto de partida para as simulações que se seguiram, por se considerar que a introdução de elementos construtivos simples não faria sentido num clima frio e rigoroso como o definido para este trabalho.

Após a caracterização geral do módulo base de construção modular, determinou-se que, ao longo deste trabalho, seria considerada a união de quatro módulos, ou seja, um total de um espaço interior único de 25 m², com 4 ocupantes. Assim, foi possível proceder às simulações previstas para cumprir os objetivos iniciais propostos. Com esta análise, foi, então, possível avaliar que todos os parâmetros considerados têm influência no consumo energético anual do edifício modular, quando sujeito à sua variação.

A variação do número de janelas demonstra a sua influência nos valores do consumo anual de eletricidade com vista ao arrefecimento, sendo que, passar de 3 para 5 janelas, pode implicar um aumento de cerca de 9,6% do consumo anual de eletricidade, para o arrefecimento. Finalmente, o tipo de atividade metabólica desenvolvida no interior

da construção modular, têm, também, grande influência na variação do consumo energético registado no edifício modular, sendo que, em Lisboa, passar de uma atividade mais sedentária para uma atividade mais intensa pode implicar um aumento de 53,3% do consumo anual de eletricidade associado ao arrefecimento da zona. Por outro lado, para Helsínquia, passar de uma atividade mais ativa para uma atividade mais sedentária, prevê um aumento de 78,3% para efeitos de aquecimento, no consumo anual de eletricidade. A análise da localização permite, ainda, perceber que, tendo em conta as características da construção modular, para o clima de Lisboa, há vantagens, do ponto de vista energético, que a construção modular seja utilizada para um tipo de atividade mais sedentário e, para Helsínquia, que seja utilizada para um tipo de atividade mais ativo. Os gráficos apresentados nas figuras 77 e 78, permitem, precisamente, observar essa situação e, para cada uma das localizações, a ordenar, os conjuntos de parâmetros analisados, de forma crescente, em função do consumo energético associado à climatização da zona ocupada. Desta forma, é possível determinar, para cada uma das localizações o conjunto de parâmetros mais favorável e menos favorável, em função dos valores anuais do consumo de eletricidade.

A análise dos resultados obtidos permitiu concluir que a fraca inércia térmica associada aos elementos construtivos que compõem esta proposta de edifício de construção modular é um problema. Por isso, para a localização de Lisboa, Portugal, foi sugerida uma proposta de melhoria que visa o aumento deste parâmetro. A introdução de bolsas de água no pavimento, foi proposta e analisada e concluiu-se que pode ser vantajosa ao nível do consumo energético anual com vista à climatização da construção modular, com uma redução anual de 6,1%. Esta proposta de melhoria não pode ser adotada para a localização de Helsínquia, devido às temperaturas negativas associadas ao clima. Neste sentido, propôs-se uma nova sugestão de melhoria que visa a configuração e otimização dos parâmetros do sistema AVAC. No entanto, apesar de se ter verificado que seria possível uma redução de 0,5% do consumo anual de eletricidade para efeitos de climatização, com a desativação de arrefecimento nos meses de inverno, houve uma conclusão mais importante a ser retirada. Com recurso ao Critério de Horas de Excedência, definido pela CIBSE, observou-se que a construção modular apresenta horas de desconforto muito acima das definidas pelo critério mencionado.

Por último, neste trabalho, foi desenvolvido e analisado o projeto energético da construção modular envolvida por uma estrutura semelhante a uma tenda. Este estudo parte da necessidade, de ao nível estrutural, precaver a possibilidade de infiltrações associadas à cobertura plana da construção modular.

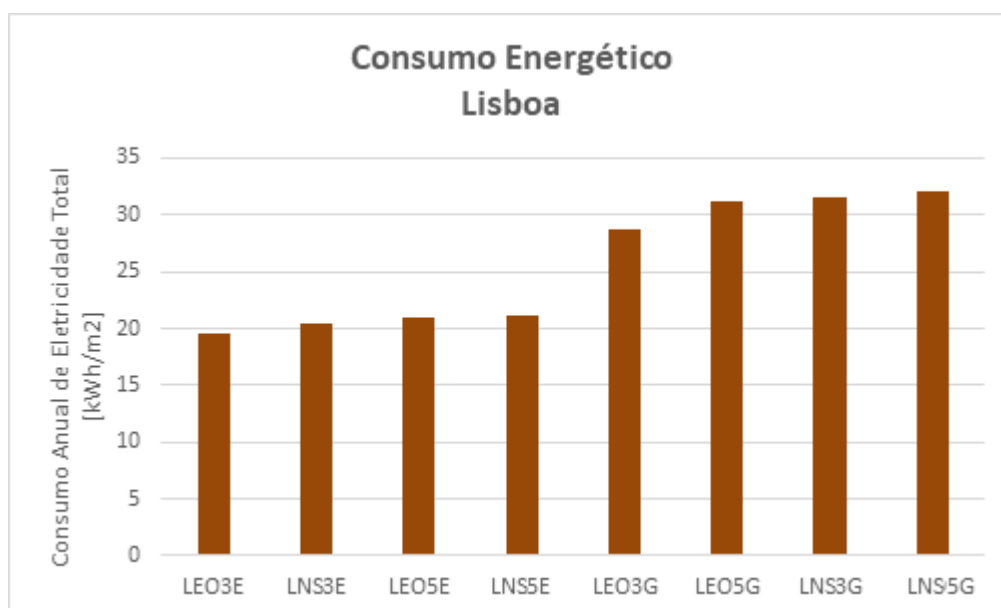


Figura 77 – Comparação dos valores totais do consumo energético anual, para efeitos de climatização, para a localização de Lisboa, Portugal.

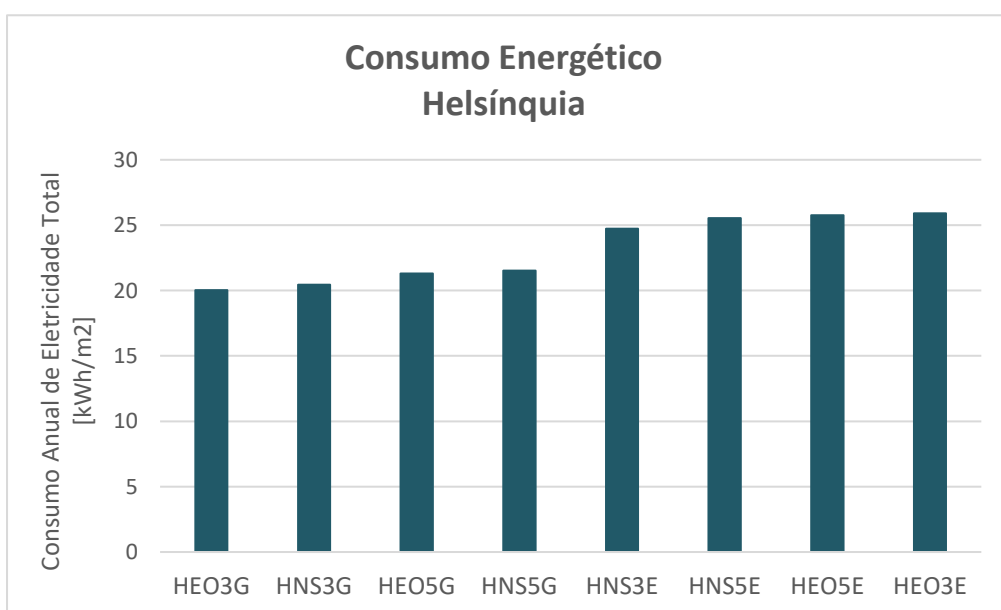


Figura 78- Comparação dos valores totais do consumo energético anual, para efeitos de climatização, para a localização de Helsínquia, Finlândia.

4.2 Conclusões Finais

O trabalho realizado assentou, essencialmente, na ideia de testar e analisar as considerações adotadas a partir do projeto estrutural prévio de um edifício de construção modular. Desta forma, foi possível realizar um primeiro estudo e perceber a situação atual da construção, do ponto de vista energético, ao nível do consumo energético para garantir os níveis de conforto térmico. Para além disto, foram também identificados alguns problemas associados à construção modular.

O objetivo inicial deste trabalho, definido como o desenvolvimento do projeto energético de uma proposta de um edifício de construção modular, a partir dos pressupostos e considerações feitas no projeto estrutural previamente definido no desenvolvimento do produto, e recorrendo-se a ferramentas de simulação dinâmica, mais concretamente, ao *software DesignBuilder* para a obtenção e análise de resultados.

A revisão bibliográfica precedente ao projeto energético, permitiu definir o conceito de construção modular e salientar a sua aplicabilidade às mais diversas situações. Foi também possível, através da revisão bibliográfica, perceber algumas das soluções construtivas atuais passíveis de aplicar aos elementos construtivos do módulo desenvolvido. Foi também feita uma revisão às questões energéticas que permitiu dar a conhecer e definir parâmetros relacionados com o conforto térmico e soluções de construção passivas. Finalmente, a revisão bibliográfica, permitiu, ainda, perceber quais os *softwares* de simulação dinâmica disponíveis, sendo que, no final, se optou pelo *software DesignBuilder*.

As características da construção modular, implicam que a variação da localização possa implicar um aumento do consumo anual de eletricidade de 80,4%, correspondentes a 30,68 kWh/m², para Lisboa e 6,00 kWh/m², para Helsínquia, com vista ao arrefecimento, ao passar de Helsínquia para Lisboa, e um aumento do consumo anual de eletricidade de 78,3%, associados a 1,45 kWh/m², para Lisboa, e 15,53 kWh/m², para Helsínquia, com vista ao aquecimento, ao passar de Lisboa para Helsínquia. Relativamente à orientação da implantação da construção modular, apenas se verifica uma ligeira influência com a sua variação. Ao observar a figura 77, é possível concluir que, em Lisboa, o conjunto de parâmetros mais vantajoso é aquele que está associado à construção modular com uma orientação Este/Oeste, com três janelas e para uma situação de escritório e o conjunto de parâmetros menos vantajoso é aquele que está associado à construção modular com uma orientação Norte/Sul, com cinco janelas e para uma situação de ginásio. Por outro lado, com recurso à figura 78, conclui-se que, para Helsínquia, o conjunto de parâmetros mais vantajoso é aquele que está associado à construção modular com uma orientação Este/Oeste, com três janelas e para uma situação de ginásio e o conjunto de parâmetros menos vantajoso é aquele que está associado à construção modular com uma orientação Este/Oeste, com três janelas e para uma situação de escritório.

Como o *software DesignBuilder* não prevê a existência de componentes que permitam a criação de uma tenda, foi necessário desenvolver estratégias que aproximassem uma situação criada por uma tenda. Neste sentido, foram apresentadas duas estratégias, uma utilizando o *componente block* e outra definindo a nova zona criada entre a tenda e a construção modular como um *Plenum*. As simulações feitas, permitiram concluir que a primeira estratégia não poderia ser adotada para representar a situação criada por uma tendo, uma vez que, os valores obtidos indicaram que o *componente block* funciona como sombreamento. Por outro lado, com recurso à segunda estratégia já foi, então, possível obter valores que seriam espectáveis naquela situação. Desta forma, foi possível concluir que para Lisboa, a introdução da tenda não é uma solução viável, pois influencia o aumento anual do consumo de eletricidade para o arrefecimento da zona, quer no verão, quer no inverno. Para Helsínquia o mesmo se verifica apenas para o verão, em que há um aumento do consumo anual de eletricidade para o arrefecimento que ultrapassa a diminuição do consumo de eletricidade anual para o aquecimento. No entanto, há possibilidade de a tenda ser introduzida nos meses de inverno.

Em suma, na perspetiva de dar resposta à questão apresentada para os objetivos deste trabalho, é possível concluir que a utilização de ferramentas de simulação dinâmica, como o *software DesignBuilder*, permitem gerar virtualmente modelos representativos e adaptados as situações e às considerações desejadas e dessa forma, obter resultados, para inúmeros parâmetros, que podem ser selecionados de acordo com a necessidade de análise dos mesmos, como se demonstrou ao longo deste trabalho. Por outro lado, é também possível concluir que os resultados obtidos podem ser considerados como representativos da realidade e, desta forma, serem utilizados como uma base para a tomada de decisões importantes ao nível do projeto de desenvolvimento do produto, podendo mesmo ser vantajosa do ponto de vista monetário, devido à possibilidade de otimização de parâmetros. Assim, considera-se a utilização de ferramentas de simulação dinâmica como uma mais valia no processo de desenvolvimento do projeto energético do módulo de construção modular.

4.3 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, seria importante, otimizar os sistema AVAC de forma a que o número de horas de desconforto cumpra o Critério de Horas de Excedência, definido pela CIBSE e respeite as necessidades energéticas para edifícios passivos.

Também como trabalho futuro seria interessante, o desenvolvimento de uma solução construtiva que oferecesse uma melhor inercia térmica, mas simultaneamente fosse compatível com os requisitos funcionais de montagem e instalação da solução construtiva do edifício (DIY), o que eventualmente poderia passar por soluções como substituir os atuais elementos construtivos da construção modular por PCM e estudar o custo do investimento com o custo associado à climatização da zona ocupada.

Realização de ensaios experimentais reais que pudessem validar, de uma forma mais assertiva e detalhada, os resultados obtidos por simulação neste trabalho.

Referências

AAG - ATELIER ALBERTO GREY - **O que é o Certificado Energético? | Certificação Energética** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 27 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.lxcertificadoenergetico.com/certificacao-energetica-informacao/>>.

ADENE - **Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) - Perguntas & Respostas**. 2018.

AIA - **Gemma Observatory - AIA** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 28 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.aia.org/showcases/136136-gemma-observatory>>.

ALMEIDA, Hélder Silva - **Análise do conforto térmico de edificios utilizando as abordagens analítica e adaptativa**. [S.l.] : Instituto Superior Técnico, 2010

ASHRAE - **ANSI/ ASHRAE Standard 55**. Atlanta, USA, 2013.

ASHRAE - **Handbook of Fundamentals**. Inch-Pound ed. Atlanta, USA : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, 2009. ISBN 978-1-933742-54-0.

BASU, Anirban - **The Economic & Financial Performance of Relocatable Buildings in the U.S. Modular Building Industry**. 2012.

CIBSE - **TM 52 (CIBSE) Limits of thermal comfort: avoid overheating in European buildings**. [S.l.] : Page Bros. (Norwich) Ltd., 2013. ISBN 9781906846343.

COOPER, Louis - **Proceedings, American-Soviet building conference**, 1945.

COSTA PEREIRA, Alfredo; VASCONCELOS BESSA, Raul - **Eficiência Energética dos Sistemas de AVAC em Edifícios**. 2013.

DEPARTAMENTO DE AR CONDICIONADO - **A Importância de uma Boa Distribuição do Ar**. 2014.

DESIGNBUILDER - DesignBuilder Software Ltd - **Simulation** [Em linha], atual. 2019. a. [Consult. 15 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://designbuilder.co.uk/simulation>>.

DESIGNBUILDER - **Simulation Detailed Results** [Em linha], atual. 2019. b. [Consult. 8 jun. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://designbuilder.co.uk/helpv1/Content/Comfort_Analysis.htm>.

EFLUL - **Potência Elétrica Média de Aparelhos Elétricos**, atual. 2019.

ETHERINGTON, Rose - **OceanScope by AnL Studio** [Em linha], atual. 2010. [Consult. 1 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.dezeen.com/2010/02/15/oceanscope-by-anl-studio/>>.

FANGER, P. O. - **Thermal Comfort, Analysis and applications in environmental engineering**. Danish Tec ed. Copenhagen : Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. ISBN 19722700268.

FISHER, Howard - «Prefabrication. What Does It Mean to The Architect?» **Journal of The American Institute of Architects**. 1948.

GAMA, Filipa - **Análise do desempenho térmico de casas modulares pré-fabricadas**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2013

GEIGER, Rudolf - **Classificação climática de Köppen- Geiger** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>.

GIBB, Alistair - **Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation**. [S.l.] : John Wiley & Sons, 1999

GOMES, Miguel - **Análise Energética de Construção Modular com Contentores Marítimos**. [S.l.] : Universidade da Beira Interior, 2010

GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. - **Conceitos Bioclimáticos para Edifícios em Portugal**. Lisboa : DGGE, 2004. ISBN 972-8268-34-3.

GREENHECK FAN CORPORATION - **Dedicated Outdoor Air Systems** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 5 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.greenheck.com/products/air-conditioning/dedicated-outdoor-air-systems>>.

HAAS, Carl *et al.* - **Prefabrication and Preassembly Trends and Effects on the Construction Workforce**. Austin, Texas : Center for Construction Industry Studies, 2000

HOME, Eco Container - **Eco Container Home** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 1 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://ecocontainerhome.com/the-travelodge-shipping-container-hotel-uxbridge-uk/>>.

INVESTWOOD - **Valchromat - Ficha de Produto** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 2 mai. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.valchromat.pt/documentos.aspx?menuid=21>>.

IPMA - **IPMA - Clima** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 11 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/clima/index.html>>.

KALKIN, Adam - **Quik House** [Em linha], atual. 2009. [Consult. 1 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.prefabs.com/PrefabHomes/AdamKalkin/QuikHouse.htm>>.

KELLY, Burnham - **THE PREFABRICATION OF HOUSES**. Londres : Chapman & Hall, Lda, 1951

LAMBERTS, Roberto - **Desempenho Térmico de edificações**. 2011.

MAKEITFROM.COM - **Material Properties Database** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 2 jun. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.makeitfrom.com/property-search/Specific-Heat-Capacity>>.

MANUFACTURERS INSTITUTE - **Prefabricated Home**. 1947.

MASSIMO, Dini - **Renzo Piano, Projects and Buildings, 1964-1983**. Milão : Rizzoli International Publications, Inc, 1984. ISBN 978-0847805136.

MATEOBLUE - **Arquivo meteorológico Helsínquia - meteoblue** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 14 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/archive/helsinquia_finlandia_658225?fcstlength=1m&year=2018&month=1>.

MBI - **CHANGING THE WAY THE WORLD BUILDS 2015 ANNUAL REPORT - PCM & RB**. 2015.

MCQUAID, Matilda - **Shigeru Ban**. Nova Iorque : Phaidon Press, Inc, 2003. ISBN 978-0714846293

MIGUEL, Inês; ABRANTES, Macedo - **Requisitos de casas passivas para o clima português: Estudo comparativo entre a regulamentação nacional e os requisitos Passive House**. [S.l.] : Universidade de Coimbra, 2014

MORET RODRIGUES, A.; CANHA DA PEIDADE, A.; BRAGA, A. M. - **Térmica de Edifícios**. [S.l.] : ORION, 2009. ISBN 9789728620134.

MOSCHE, Safdie - **Beyond Habitat**. Montreal, Quebec : Tundra Books of Montreal, 1970. ISBN 9780887760112.

NGUYEN, Oanh - **What is a Dedicated Outdoor Air System?** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 5 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.refrigerationschool.com/blog/hvacr/dedicated-outdoor-air-system/>>.

OLIVEIRA, António - **Vãos Envidraçados, Desempenho Térmico e Conforto Térmico**

Humano - Modelo Simplificado de Seleção. [S.l.] : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016

PASSIVE HOUSE INSTITUTE - **Passive House Institute** [Em linha], atual. 2015. [Consult. 25 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm>.

PEREIRA, Simão - **Climatização passiva em edifício de serviços.** [S.l.] : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013

POMBO, Marisa - **Análise do Desempenho Térmico de Edifícios Clima , Comportamento Térmico e Sustentabilidade dos Materiais.** Castelo Branco : Instituto Politécnico de Castelo Branco, 2016

RAMOS, Ernesto - **A QAI e os sistemas AVAC - Requisitos de Filtragem.** 2011.

RELVAS, Carlos - **Design & Engenharia - da ideia ao produto.** Porto : Publindústria, Edições Técnicas, 2017. ISBN 9789897232404.

RUAS, A. C.; LABAKI, L. C. - **Contribuição à Aplicação Prática das Normas Internacionais na Avaliação do Conforto Térmico.** Campinas : [s.n.]

SCHOENBORN, Joseph M. - **A Case Study Approach to Identifying the Constraints and Barriers to Design Innovation for Modular Construction.** Diss. Virginia Tech. 2012.

SILVA, Nuno - **Conceção e desenvolvimento de um edifício modular.** [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2017

SMITH, Elisabeth - **Case Study Houses: 1945-1966: The California Impetus.** Hong Kong : TASCHEN GmbH, 2007. ISBN 9783822846179.

SMITH, Ryan - **PERMANENT MODULAR CONSTRUCTION. Process. Practice. Performance.** 2015.

SMITH, Ryan; TIMBERLAKE, James - **Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction.** New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 978-0-470-27561-0.

SODECA - **Recuperadores de calor, unidades de filtração e tratamento de ar.** 2018.

STANDARDIZATION, International Organization For - **EN ISO 7 730 - Ergonomics of The Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV an PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria.** Geneva : [s.n.]

TORCELLINI, P.; PLESS, S.; DERU, M. - Zero energy buildings: A critical look at the definition. Em **Energy** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>. ISBN NREL/CP-550-39833

TRESPA - **Trespa Pura NFC** [Em linha], atual. 2019. Disponível em WWW:<URL:https://www.trespa.com/pt-pt/documentation/exterior-sidings>.

TUGA BUSINESS - **Casas Pré-Fabricadas SIP - Tuga Business** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 28 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:http://www.tugabusiness.pt/casas-preacute-fabricadas-sip.html>.

VARELA, Mafalda - **A casa modular vista na perspetiva do engenheiro mecânico**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2015

WEATHER TRAVEL - **Lisbon Climate Guide: Monthly Weather, Portugal** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 14 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.weather2travel.com/climate-guides/portugal/lisbon.php>.

WEATHER TRAVEL - **Helsinki Climate Guide: Monthly Weather, Finland** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 14 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.weather2travel.com/climate-guides/finland/helsinki.php>.